

УДК 669.184.244

©Сущенко А.В.<sup>1</sup>, Гриценко А.С.<sup>2</sup>

## **ОРГАНИЗАЦИЯ НЕСИМЕТРИЧНОГО ТЕЧЕНИЯ ВОДЫ В СИСТЕМАХ ОХЛАЖДЕНИЯ НАКОНЕЧНИКОВ КИСЛОРОДНЫХ ФУРМ**

*С использованием результатов численного моделирования гидродинамики течения воды в кислородных фурмах верхнего дутья выполнен анализ эффективности существующих и разработаны новые конструкции систем несимметричного охлаждения фурменных наконечников.*

**Ключевые слова:** кислородная фурма, система охлаждения, гидродинамика, численное моделирование, технические решения, повышение стойкости.

*Сущенко А.В., Гриценко А.С. Організація несиметричної течії води в системах охолодження наконечників кисневих фурм. З використанням результатів чисельного моделювання гідродинаміки течії води у кисневих фурмах верхнього дутья виконаний аналіз ефективності існуючих та розроблені нові конструкції систем несиметричного охолодження фурмених наконечників.*

**Ключові слова:** киснева фурма, система охолодження, гідродинаміка, чисельне моделювання, технічні рішення, підвищення стійкості.

*A.V. Sushchenko A.S. Gritsenko. Organization of asymmetric water flow in oxygen lance tip cooling system. The analysis of efficiency of the existing cooling systems for oxygen lance tips was performed and new designs of the system of asymmetric cooling of lance tips with application of the results of numerical modelling of water flow hydro-dynamics.*

**Keywords:** oxygen lance, cooling system, numeral modeling, technical solutions, rise of firmness.

**Постановка проблемы.** От конструкции и эффективности работы системы охлаждения кислородной фурмы зависит не только стойкость самой фурмы и её наконечника (головки), изготовленного из дорогостоящей меди, но и безопасность конвертирования чугуна, а также стабильность параметров выходных участков сопел и дутьевого режима плавки, определяющего практически все основные технико-экономические показатели конвертерного процесса. Поэтому, на всех этапах развития конвертерного производства стали, вопросу надежного охлаждения продувочных фурм уделялось значительное внимание, а также было посвящено большое количество исследований и публикаций.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Как известно, одной из основных проблем при организации эффективного охлаждения фурмы с центральным подводом кислорода и оптимизации течения воды в ней является сложность подачи достаточного количества воды в центральное межсопловое пространство наконечника и обеспечения высоких скоростей охладителя в местах максимального теплового воздействия на головку [1 и др.]. В используемых в настоящее время системах охлаждения фурменных наконечников для решения указанной проблемы применяют специальные разделители, распределители, направляющие вкладыши, дополнительные патрубки и т.п. различных конструкций [2 и др.]. При этом, с одной стороны, существенно усложняется (а в некоторых случаях становится практически невозможным) промышленное изготовление наконечников, а с другой стороны, - за счет организации симметричного течения охладителя протекающие через межсопловые зазоры потоки воды взаимно тормозятся в центре головки, в результате чего могут образовываться застойные зоны и неорганизованные вихревые течения.

Вместе с тем, обеспечить устойчивую циркуляцию охладителя через центральную часть головки можно конструктивно значительно проще при организации несимметричного течения воды в ней. Такие технические решения были предложены, например, в работах [3 – 6]. Одна-

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

<sup>2</sup> студент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

ко, до настоящего времени идея организации несимметричного течения воды в фурменных наконечниках не получила практического развития.

**Целью настоящего исследования** являлось проведение анализа эффективности работы известных и разработка новых более совершенных систем охлаждения наконечников кислородно-конвертерных фурм, основанных на организации несимметричного течения воды в них.

**Изложение основного материала.** Анализ эффективности работы систем охлаждения кислородных фурм выполнялся на основе результатов численного моделирования (с использованием программного комплекса FlowVision) гидродинамики течения воды в наконечниках различных конструкций, при прочих эквивалентных условиях, по методике, изложенной в [7].

В качестве объекта исследования рассматривались конструкции систем охлаждения наконечников кислородных фурм 130-180 т конвертеров. При этом их конструктивные и режимные параметры работы были взяты по производственным данным (в т.ч.: диаметр наружной трубы фурмы 219 мм, расход охлаждающей воды 100 - 120 м<sup>3</sup>/ч).

На рис. 1 представлен пятисопловый фурменный наконечник с упрощенной симметричной системой охлаждения, в которой концевая часть промежуточной трубы ствола фурмы выполняет роль разделителя воды между подводящим и отводящим ее каналами. Такая конструкция не содержит специальных распределителей воды и зачастую применяется в фурмах малых диаметров (219 мм и менее), особенно при использовании литых наконечников с утолщенными стенками, в которых конструктивно достаточно сложно сделать направляющие межсопловые вставки. При дальнейшем анализе этот вариант конструкции наконечника и системы его охлаждения был принят в качестве базового.

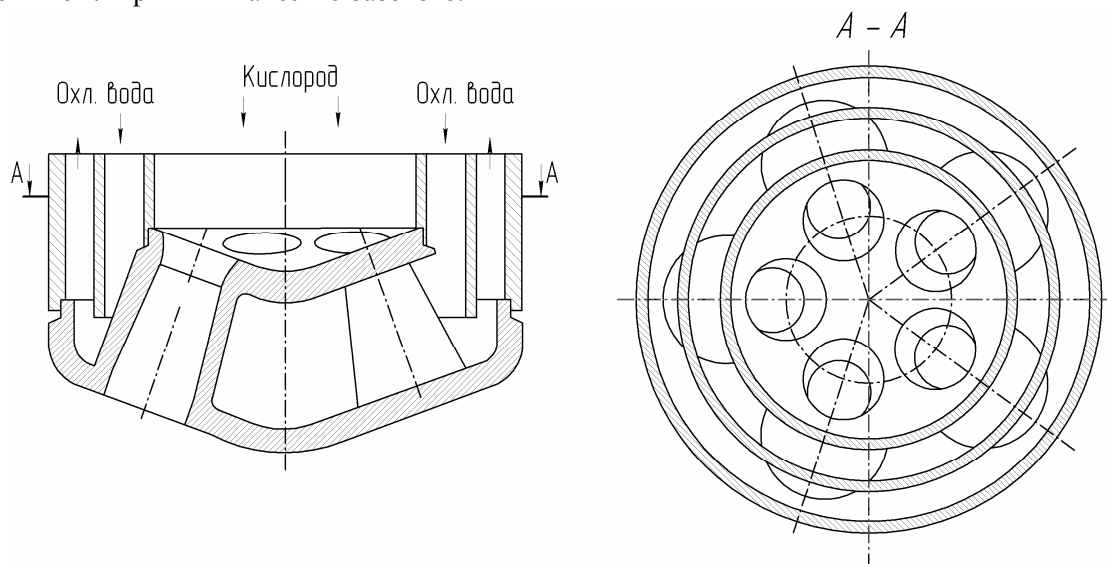


Рис. 1 – Наконечник кислородной фурмы литой конструкции с упрощенной системой охлаждения

На рис. 2 изображено векторное поле течения охлаждающей воды в таком наконечнике в вертикальной плоскости, проходящей через ось фурмы и ось одного из сопел. При этом абсолютное значение скорости потока охладителя отражено цветом в соответствии с градуировкой, приведенной в правой части рисунка.

Как и было получено ранее [1], работа системы охлаждения указанной конструкции характеризуется следующими недостатками. Основной поток охладителя, не заходя в межсопловую область, перетекает из подводящего тракта в отводящий, непосредственно под разделительной трубой с высокой скоростью, а доля «свежей» воды, циркулирующей через центральное межсопловое пространство наконечника (от общего её расхода на фурму) -  $\varphi_{ц}$  составляет порядка 2 %. Течение охладителя вблизи наиболее теплонапряженной центральной части торца головки имеет минимальную скорость (около 0,5 м/с), является неустойчивым и неорганизованным. Потери давления воды в наконечнике составляют  $\Delta P_{н} = 0,02 - 0,05$  МПа в зависимости от положения промежуточной трубы относительно торцевой части головки.

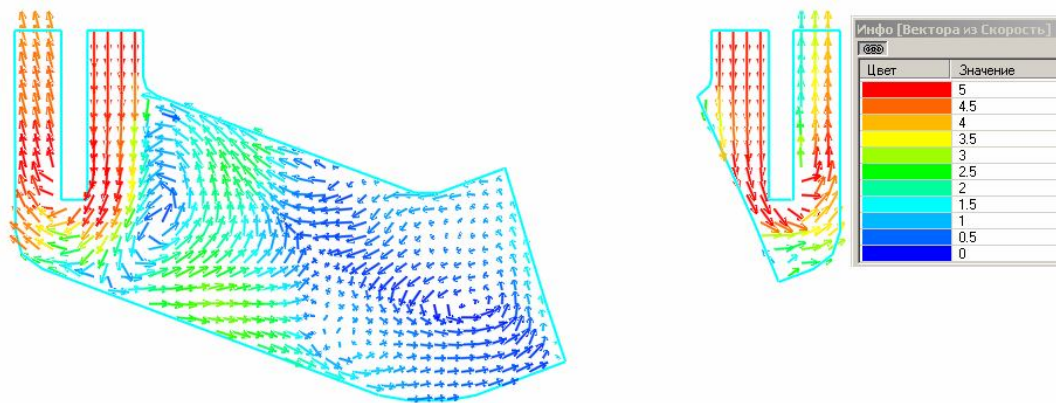


Рис. 2 - Результаты моделирования течения охлаждающей воды в наконечнике фурмы с упрощенной системой охлаждения

В одном из первых технических решений, направленных на организацию несимметричного течения воды в наконечнике [3], было предложено водяной тракт, образованный наружной и кислородной трубами разделить вдоль всего ствола фурмы продольными пластинами пополам на два отсека, один из которых служит для подвода, а другой для отвода воды (см. рис. 3). При этом улучшение охлаждения фурменной головки достигается за счет вынужденного «поперечного» движения воды в ней, что предотвращает образование центральной застойной зоны охладителя (в межсопловом пространстве), способствует повышению стойкости наконечника и надежности его работы. Кроме того, при использовании такой конструкции ствола фурмы, по сравнению с классическим трехтрубным вариантом, существенно уменьшаются ее стоимость и вес, а также упрощаются изготовление и ремонт.

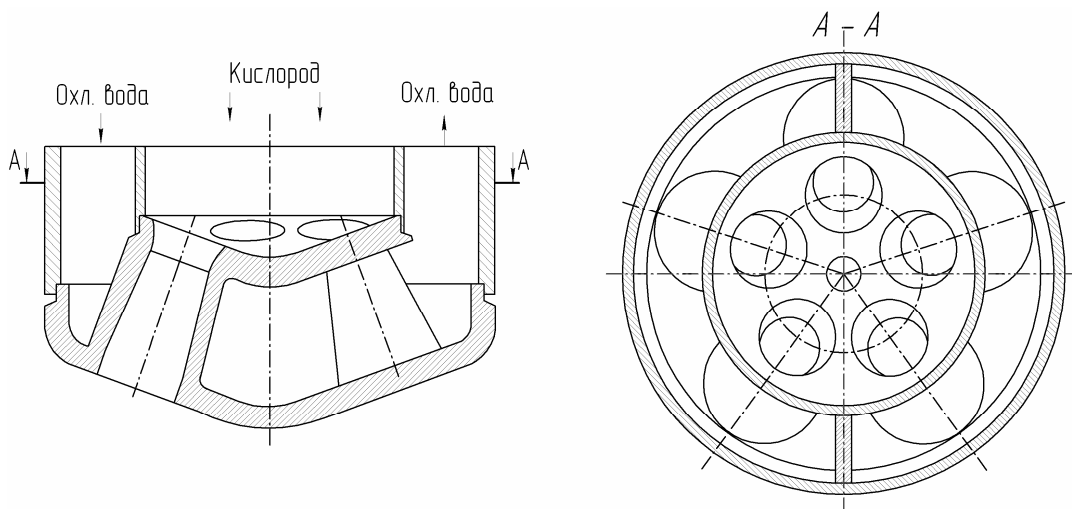


Рис. 3 – Наконечник двухтрубной кислородной фурмы с полукольцевыми трактами подвода и отвода охлаждающей воды

Однако в производственных условиях разделить тракт подвода воды специальными пластинами по всей длине ствола фурмы практически невозможно. Из-за неизбежных механических деформаций, температурных удлинений и напряжений места соединений разделительных пластин с трубами фурмы будут разрушаться. При этом основная часть воды (а вероятнее – весь ее поток) будет перетекать из подводящего в отводящий полукольцевой тракт вдали от наконечника, исключая движение воды в нем и в нижней части ствола фурмы. Это приведет к быстрому выходу фурмы из строя и может вызвать возникновение аварийной ситуации.

При решении задачи организации несимметричного течения воды в фурменном наконеч-

нике в работе [4] была предложена конструкция ствола фурмы с эксцентричным расположением его средней трубы (см. рис. 4). Вследствие существенной разности гидравлических сопротивлений диаметрально противоположных ассиметричных полукольцевых трактов подвода и отвода воды в фурме имеет место переток воды через центральную межсоединительную область наконечника: часть потока перетекает из полукольцевого тракта подвода воды с большим сечением в полукольцевой тракт отвода воды с большим сечением. Как показали результаты численного моделирования, в этом случае в центральную межсоединительную зону головки попадает ~ 10 - 12 % «свежей» воды; течение охладителя вблизи наиболее теплонапряженной центральной части торца фурмы имеет скорость  $w_{ц}$  порядка 1,3 м/с и является более организованным (рис. 5) по сравнению с вариантом использования упрощенной системы охлаждения (рис. 2). Величина  $\Delta P_{н}$  имеет тот же порядок, что и в базовом варианте.

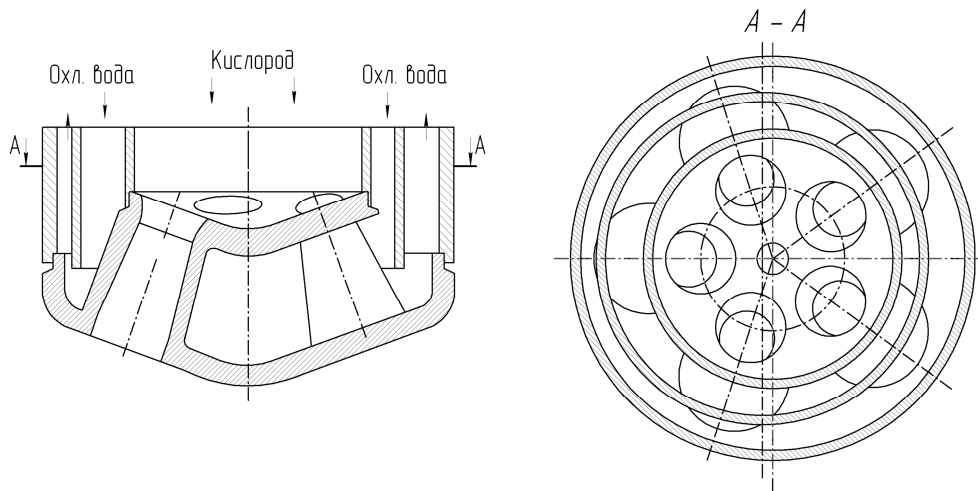


Рис. 4 – Наконечник кислородной фурмы с эксцентрично расположенной средней трубой

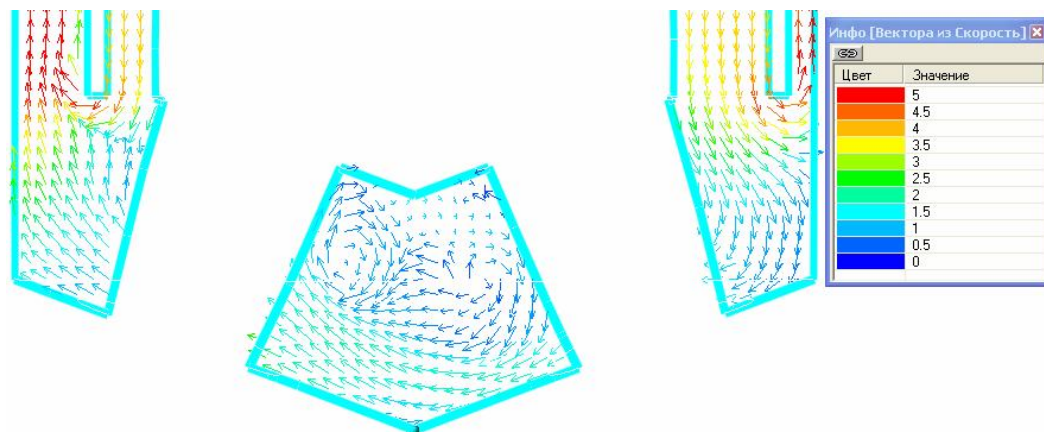


Рис. 5 – Результаты моделирования течения охлаждающей воды в наконечнике фурмы с эксцентрично расположенной средней трубой

Однако достигнутые значения параметра  $w_{ц}$  являются недостаточными для гарантированного обеспечения высокой стойкости фурменного наконечника. Как было показано в работе [8], для выполнения указанного условия скорость воды в центральной части головки (вблизи от торцевой поверхности) должна быть не менее 3 м/с. Кроме того, изготовление, а, в частности сборка, ствола фурмы рассматриваемой конструкции значительно усложняется по сравнению со сборкой обычного фурменного ствола с коаксиальным расположением труб и существенно ухудшается его охлаждение. Так, в зоне минимального межтрубного расстояния в тракте отвода воды имеет место максимальное гидравлическое сопротивление и, как следствие, уменьшенный

расход охладителя. Вода в указанной зоне будет больше перегреваться, вследствие чего возможно интенсивное выпадение солей жесткости. Из-за разности температур различных участков наружной трубы ствола фурмы, вследствие различного теплоотвода, возможна ее дополнительная температурная деформация.

С целью исключения указанных выше недостатков было разработано техническое решение [9], позволяющее организовать несимметричное течение охладителя через межсопловую область наконечника в фурме с симметричным расположением труб (см. рис. 6). При этом нижний торец промежуточной трубы (патрубка) фурмы выполнен с косым срезом (скошенным) таким образом, что расстояния от внутренней поверхности наконечника до наиболее близкой М и диаметрально противоположной ей наиболее дальней N точек ( $h_1$  и  $h_2$ ) на торце этой трубы находятся в определенных диапазонах. Из-за неравномерного распределения гидравлического сопротивления потоку воды в водяном тракте фурмы (по периметру выходного сечения промежуточной трубы) реализуется ассиметричный подвод воды в наконечник и, как следствие, – направленный переток части подведенной воды через его центральную часть. Поток воды, поступающей в наконечник вблизи точки М, разделяется на два потока: один – перетекает из подводящего тракта в отводящий вблизи указанной точки, а второй – проходя через центральную межсопловую область наконечника. При условии, что точки М и N расположены в выходном сечении средней трубы диаметрально противоположно друг к другу, вектор градиента давлений воды проходит через ось фурмы, что способствует течению охладителя именно через центр наконечника. В случае, когда торец нижней части средней трубы имеет плоское сечение, значительно упрощаются конструктивный расчет, изготовление и ремонт фурмы.

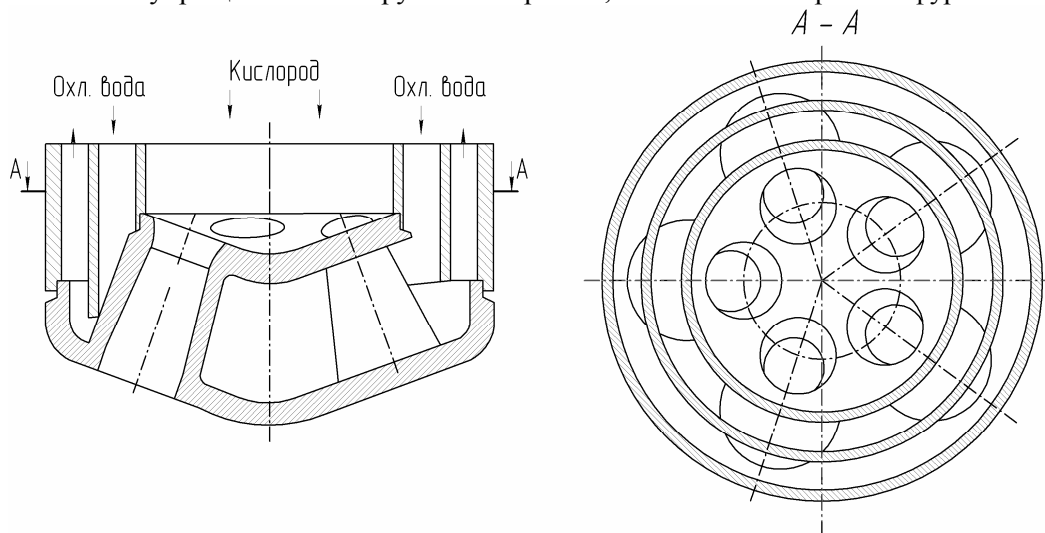


Рис. 6 – Наконечник кислородной фурмы с промежуточной трубой, выполненной со скошенным торцом

На основе моделирования гидродинамики течения охлаждающей воды в фурме разработанной конструкции (см. рис. 7) было получено, что скорость потока охлаждающей воды в межсопловой зоне  $w_u$  можно увеличить до 2,5 – 4,0 м/с в зависимости от формы нижнего торца средней трубы фурмы и характерных расстояний  $h_1$  и  $h_2$ . При этом значение параметра  $\varphi_u$  может быть увеличено до 8 – 14 % при относительно небольшом росте потерь давления воды в наконечнике ( $\Delta P_n = 0,021 - 0,035$  МПа). Максимальный эффект охлаждения центральной части головки достигается в случае, когда точка М средней трубы ствола фурмы соприкасается с внутренней поверхностью наконечника, а нижний торец этой трубы имеет ступенчатую форму.

Еще одним примером эффективного решения поставленной задачи является использование предложенной в [5, 6] и доработанной (оптимизированной) в [10], конструкции фурмы с установленными в нижней части трактов подвода и отвода воды кольцевидных вставок, перекрывающих часть их проходных сечений (рис. 8). Принцип работы несимметричной системы охлаждения наконечника фурмы такой конструкции, как и в предыдущих случаях, основан на разности гидравлических сопротивлений входных участков трактов подвода и отвода воды.

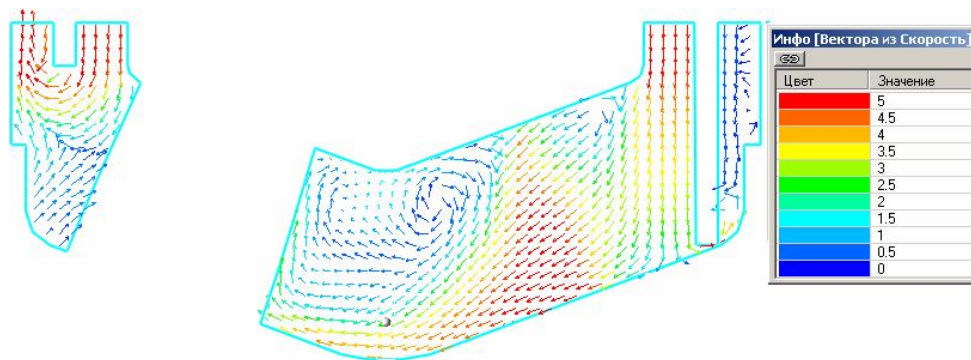


Рис. 7 – Результаты моделирование движения охлаждающей воды в наконечнике фурмы с промежуточной трубой, выполненной со скошенным торцом

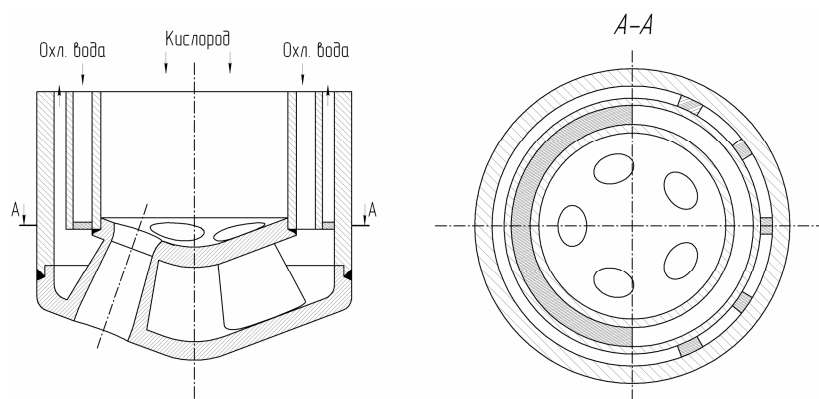


Рис. 8 – Наконечник кислородной фурмы с кольцевидными вставками в нижней части трактов подвода и отвода воды

На рис. 9, в качестве примера, приведены результаты моделирования гидродинамики течения охладителя в головке фурмы с установленной в тракте подвода воды вставкой с центральным углом  $\sigma = 180^\circ$ .

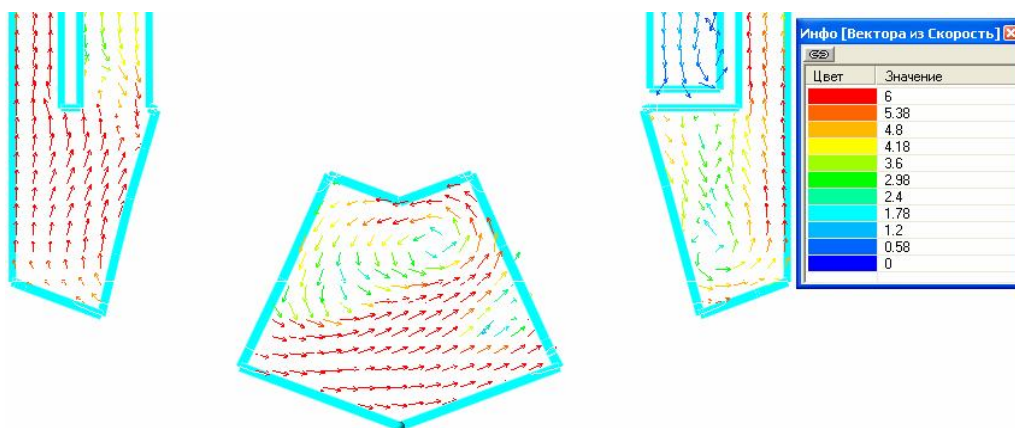


Рис. 9 - Результаты моделирование движения охлаждающей воды в наконечнике фурмы с кольцевидной вставкой в подводящем водяном тракте

При этом скорость потока охлаждающей воды в межсоловой зоне  $w_{\text{ц}}$  составляет  $\sim 5,5$  м/с, а доля «свежей» воды, циркулирующей через указанную зону  $\varphi_{\text{ц}}$  может достигать 29 %. Потери давления воды в наконечнике  $\Delta P_{\text{н}}$  возрастают в 2 – 3 раза (с 0,02 до 0,07 МПа). При изменении величины угла  $\sigma$  в области ее оптимальных значений от  $140^\circ$  до  $220^\circ$ , значение параметра  $w_{\text{ц}}$

увеличивается от 5 м/с до 8 м/с, а  $\Delta P_H$  - от 0,045 МПа до 0,102 МПа.

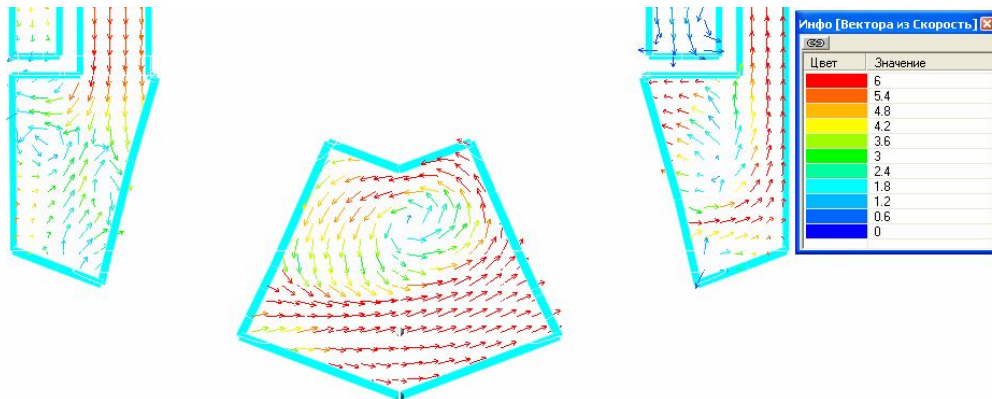


Рис. 10 - Результаты моделирование движения охлаждающей воды в наконечнике фурмы с вставками в подводящем и отводящем водяных трактах

При установке в полукольце нижней части тракта отвода воды (диаметрально противоположно кольцевидной вставке тракта подвода воды) одной или нескольких дополнительных кольцевидных вставок имеет место усиление эффекта несимметричного перетока воды через центральную межспловую область наконечника. Оптимальная суммарная площадь перекрытия тракта отвода воды составляет 5 – 40 % от общей площади его проходного сечения. На рис. 10 представлены результаты моделирования течения воды в головке фурмы с вставкой в тракте подвода воды с центральным углом  $\sigma = 180^\circ$  и с 5 вставками в тракте отвода воды, перекрывающими 25 % его проходного сечения. При этом величина  $w_u$  составляет 6,5 м/с,  $\varphi_u$  достигает 35 %, а  $\Delta P_H = 0,09$  МПа.

Так же возможно комбинирование предложенных технических решений (скошенной торцевой части внутренней трубы фурмы и кольцевидных вставок в ее подводящем и отводящем водяных трактах) при проектировании систем охлаждения наконечников кислородных фурм сталеплавильных агрегатов.

### Выводы

1. Подтверждено, что используемая на практике упрощенная система охлаждения наконечника кислородной фурмы для верхней продувки сталеплавильного агрегата (роль разделителя воды выполняет концевая часть промежуточной трубы ствола фурмы) является неэффективной и не позволяет обеспечить высокую стойкость и надежную работу наконечника.
2. Проведен анализ и выявлены недостатки известных технических решений по организации несимметричного течения охлаждающей воды в головках кислородных фурм.
3. Разработаны новые эффективные системы охлаждения наконечников кислородных фурм, основанные на организации несимметричного течения воды в головке, позволяющие (по сравнению с базовым вариантом  $\varphi_u \sim 2\%$ ,  $w_u \sim 0,5$  м/с) увеличить долю «свежей» воды, циркулирующей через центральную межспловую область головки и скорость её движения вблизи наиболее теплонапряженной центральной части торца в 5 – 15 раз.

*В работе принимал участие ассистент кафедры ПТЭУ А.П. Балаба.*

### Список использованных источников:

1. Сущенко А. В. Анализ эффективности систем охлаждения наконечников фурм кислородных конвертеров. Сообщение 1, 2 / А.В. Сущенко, А.П. Балаба // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2009. – № 1 – С. 6-9; 2009. – № 3 – С. 9-12.
2. Баптизманский В. И. Дутьевые устройства кислородных конвертеров / В.И. Баптизманский, А.Г. Величко, А.В. Шибко // Бюл. НТИ. Черная металлургия. – 1987. – № 6 – С. 2 – 15.
3. А. с. 384880 СССР, МКИ С21С 5/48. Кислородная фурма для продувки конвертера. / И.П. Большаков, И.В. Белов, Л.М. Никулин, Р.Ш. Горяев; ВНИИ металлургической теплотехники -

- № 1774052/22-02; заявл. 17.04.72; опубл. 29.05.73, Бюл. № 25. – 2 с.
4. А. с. 632732 СССР, МКИ С 21 С 5/48. Многосопловая водоохлаждаемая фурма / Б.Н. Катенин, В. Ф. Николаев, Е. А. Кричевцов, Ю. Н. Борисов; ВНИИ металлургической теплотехники-№ 2563122/22-02; заявл. 21.01.76; опубл. 03.09.77. Бюл. № 5. – 3 с.
5. А. с. 1174481 СССР, МКИ С 21С 5/48. Фурма. /П.И. Шам, Г.А. Рудаков, Ф.В. Крайзингер, А.А. Ларионов, и др.; ЖдМИ. - № 3516216/22-02; заявл. 01.12.82; опубл. 23.08.85, Бюл. № 31. – 2 с.
6. Шам П.И. Усовершенствованная конвертерная фурма. / П.И. Шам, А.А. Ларионов, А.А. Рудаков. // Металлург – 1986. - № 1.
7. Сущенко А.В. Применение программного комплекса FlowVision для решения задач оптимизации систем охлаждения дутьевых устройств металлургических агрегатов / А.В. Сущенко, А.П. Балаба // Инженерные системы – 2009. – М. : РУДН, 2009. – Том 1. –С. 3 – 7.
8. Сущенко А.В. Анализ работы кислородно-конвертерных фурм верхнего дутья в критических условиях / А.В. Сущенко, А.П. Балаба // Сталь. – 2011. – № 8 – С. 51-55.
9. Пат. 91456 України, МПК С21С 5/48. Багатосоплова водоохолоджувана фурма для продування розплаву / А.В. Сущенко, О.П. Балаба, О.С. Гриценко; ПГТУ. - № а200904026; заявл. 24.04.09; опубл. 26.07.10, Бюл. № 14. – 8 с.
10. Пат. 91449 України, МПК С21С 5/48, С21С 5/46. Водоохолоджувана фурма для продування розплаву / А.В. Сущенко, О.С. Гриценко; ПГТУ. - № а20092090; заявл. 10.03.09; опубл. 26.07.10, Бюл. № 14. – 8 с.

#### **Bibliography:**

1. Sushchenko A. V., Analysis of efficiency of tips oxygen lances cooling system. Message 1, 2 / A. V. Sushchenko, A. P. Balaba, // Izv. VUZov. Chernay Metallurgia. – 2009. - № 1, P 6-9; 2009. - № 3 – P. 9-12. (Rus.)
2. Baptizmansky V.I. Blowing devices for oxygen-blown vessels / V. I. Baptizmansky, A.G. Velichko, A.V. Shibko // Byl. NTI. Chernay Metallurgia. – 1987. - № 6 – P. 2 – 15. (Rus.)
3. Pat. 384880 SSSR, IPC C21C 5/48. Oxygen Lance for BOF / Bolshakov I. P., Belov I.V., Nikulin L. M., Goryaev R. S.; VNIИ metallurgical heating engineering - № 1774052/22-2; stated 17.04.72; published 29.05.73, Bull. № 25. – 2 p. (Rus.)
4. Pat. 632732 SSSR, IPC C21C 5/48. Multi nozzles water-cooled lance / Katenin B. N., Nikolaev V. F., Rrichevcov E. A., Borisov Y. N.; VNIИ metallurgical heating engineering - № 2563122/22-02; stated 21.01.76; published 03.09.77, Bull. № 5. – 3 p. (Rus.)
5. Pat. 1174481 SSSR, IPC C21C 5/48. Lance / Sham P.I., Rudakov G. A., Krayzinger F. V., Larionov A. A., Tarpinyan D. O., Harahulah V. S., Lykimson G. M., Yankovsky V. S.; JdMI - № 3516216/22-02; stated 01/12/82; published 23/08/85, Bull. № 31. – 2 p. (Rus.)
6. Sham P.I. Improved lance design. / P. I. Sham, A. A. Larionov, G. A. Rudakov. // Metalurg – 1986. - № 1. (Rus.)
7. Sushchenko A.V. Using program complex FlowVision to decision tasks of optimization blow devices of metallurgical aggregates cooling systems. / A. V. Sushchenko, A. P. Balaba // Injenernie sistemi – 2009. – М.: RUDN, 2009. – Т. 1 – P. 3-7. (Rus.)
8. Sushchenko A.V. Analysis of work oxygen lances for BOF in the critical conditions / A.V. Sushchenko, A.P. Balaba, // Steel. – 2011. – № 8 – P. 51-55. (Rus.)
9. Pat. 91456 Ukraine, IPC C21C 5/48. Multinozzle water-cooled lance for blowing melt / Sushchenko A.V., Balaba A.P., Gritsenko A.S.; PSTU. - № а20090426; stated 24.04.09; published 26.07.10, Bull. № 14. – 8 p. (Ukr.)
10. Pat 91449 Ukraine, IPC C21C 5/48, C21C 5/46. Water-cooled lance for blowing melt / Sushchenko A.V., Gritsenko A.S.; PSTU. - № а20092090; stated 10.03.09; published 26.07.10, Bull № 14. – 8 p. (Ukr.)

Рецензент: В.А. Маслов  
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 7.09.2011