

## Изучение влияния низковольтного потенциала на характер разбрызгивания жидкости при ее продувке сверху путем физического моделирования

Приведены результаты лабораторных исследований на физической модели ЛД-процесса влияния дутьевых режимов на характер разбрызгивания жидкой среды внутри модели, а также на вынос капель за её пределы при продувке сверху. Установлены особенности влияния внешних низковольтных потенциалов на процесс разбрызгивания жидкости при различных дутьевых режимах. Показана возможность снижения выноса капель жидкости за пределы модели, особенно при подключении к фурме положительной полярности источника тока.

**Ключевые слова:** физическое моделирование, продувка жидкой среды, фурменные модули, низковольтный потенциал

На сегодняшний день среди металлургов не существует единого мнения о природе и закономерностях, определяющих вынос металла из конвертера при его продувке [1-3], и отсутствует эффективный способ, позволяющий существенно сократить объём этих потерь, поэтому исследования по изучению и уточнению основных факторов, влияющих на особенности и характер процесса разбрызгивания, остаются актуальными.

**Цель работы:** на физических моделях, имитирующих конвертерный процесс с верхней продувкой, определить долю влияния дутьевых параметров на особенности и характер процесса разбрызгивания от механического дробления жидких электропроводящих сред путём количественной оценки интенсивности формирования брызг в двух областях модели (фурменной и пристеночной), а также потерь жидких сред за пределы модели, в том числе при использовании низковольтных электрических потенциалов.

**Методика исследований.** Исследования выполнены на прозрачной модели в масштабе 1:30, имитирующей 160-тонный конвертер, с возможностью подвода низковольтного электрического потенциала к корпусу фурмы и к донному электроду, контактирующему с электропроводящей жидкостью согласно методу, описанному в работе [4]. Была проведена продувка азотом водного раствора поварённой соли (наиболее близкого по кинематической вязкости к железоуглеродистому расплаву) через верхние продувочные модули с числом цилиндрических сопел от одного до пяти, изготовленных таким образом, что общее сечение сопел на каждой фурме было одинаково, что обеспечивало равный расход газа на фурму независимо от количества сопел при одинаковом давлении его перед фурмой.

Помимо известной методики физического моделирования конвертерного процесса, базирующейся на геометрических и газодинамических критериях подобия, была использована методика подвода к фурме и донному электроду низковольтных электрических потенциалов. Дополнительно была раз-

работана методика дифференцированного контроля интенсивности разбрызгивания жидкости в двух характерных зонах рабочего объёма модели (прифурменной и пристеночной), в том числе по высоте модели, а также количества выносимых капель за её пределы. С помощью данной методики проанализирован процесс взаимодействия газовых струй с жидкостью на 10-ти горизонтах по высоте модели (что в совокупности охватывает 2/3 её высоты) по трём выбранным участкам, на которых располагали устройство с пробоотборниками:

– зона «А» – прифурменная – на расстоянии 10 мм от корпуса фурмы с расположением нижнего пробоотборника на высоте 18 мм над жидкостью, а верхнего – на высоте 180 мм (имитация движения жидкости в прифурменной зоне и набрызгивания среды на корпус фурмы);

– зона «Б» – пристеночная – на расстоянии 150 мм от корпуса фурмы и 5 мм от стенки модели, расположение пробоотборников аналогично описанному в зоне «А» (имитация набрызгивания металла на стенку и горловину конвертера);

– зона «В» – вынос капель жидкости за пределы модели (имитация заметалливания элементов охладителя конвертерных газов (ОКГ), шлемовой части и рабочей площадки вокруг конвертера, в случае отсутствия герметизации горловины с элементами ОКГ).

Эксперименты проводили при неизменных дутьевых режимах по вариантам: сравнительный – вариант 1; с подведением к фурме отрицательной полярности – вариант 2. В таблице приведены основные дутьевые условия проведённых 96 экспериментов.

**Обсуждение результатов экспериментов.** В процессе исследований жидкость, собранную в пробоотборники за одну минуту продувки внутри модели, взвешивали на электронных весах АХИС-0005 (точность измерения – 0,0005 мг).

Анализ результатов сравнительных продувок подтвердил известные тенденции по влиянию дутьевых параметров в прифурменной зоне: количество брызг увеличивалось с повышением давления газа, его расхода и уменьшением количества сопел.

## Основные технологические условия экспериментов

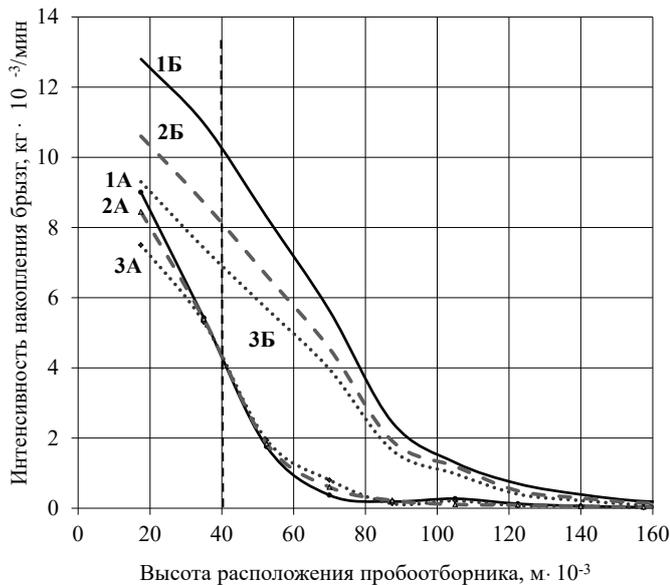
Количество сопел и угол наклона к оси фурмы	Внешнее воздействие			Давление, ати*			Положение фурмы, калибры			
	вариант 1	вариант 2	вариант 3	1,0	2,0	3,0	0	10	20	40
1 сопло, угол 0°	+	+	+	+	+	–	+	+	+	+
3 сопла, угол 20°	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
5 сопел, угол 20°	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

\*Избыточное давление газа перед соплом

Установлено, что максимальное количество брызг отмечали в зоне продувочной фурмы «А», а минимальное в зоне «В», определяющей потери за пределы модели.

Отмечена существенная зависимость интенсивности накопления брызг от высоты модели: количество собранных брызг отличалось в десятки раз между нижним и верхним горизонтами (для примера на рис. 1 приведены диаграммы изменения количества собранных брызг в двух изучаемых зонах при продувке азотом через пятисопловую фурму с давлением 2 атм, высота фурмы – 40 калибров).

Сопоставительный анализ результатов продувки через различные фурменные наконечники без применения электрических воздействий показал, что наиболее высокая интенсивность образования брызг по изучаемым зонам была отмечена при работе фурмы с односопловым наконечником, а наименьшая – с пятисопловым наконечником. Следует отметить, что в зоне «А» работа каждого наконечника фурмы имела свои особенности в плане брызгообразования



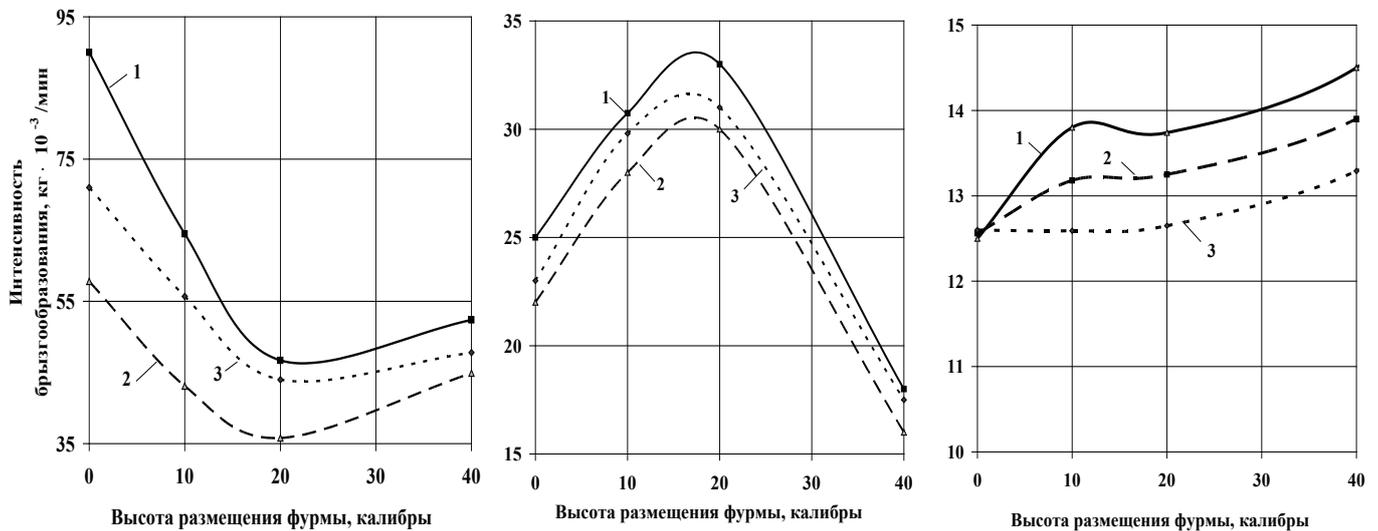
**Рис. 1.** Изменение интенсивности накопления брызг в пробоотборниках по высоте модели в зонах «А» и «Б» при продувке через фурму с пятисопловым наконечником азотом с давлением 2 ати, высота фурмы 40 калибров, по вариантам исследования: 1 – без воздействий, 2 – к фурме подведена отрицательная полярность, 3 – положительная полярность

(рис. 2). При работе фурмы с односопловым наконечником зависимость интенсивности разбрызгивания от высоты расположения фурмы носит экстремальный характер с минимумом (49 г/мин) при 20 калибрах. Такой характер брызгообразования обусловлен конструкцией фурмы, характеризующейся «жестким» вертикальным дутьём и структурой, истекающей из цилиндрического сопла струи, меняющей свою форму вдоль оси струи. Для фурмы с трёхсопловым наконечником отмечен экстремальный

характер этой зависимости с максимумом (33 г/мин) при 18 калибрах, то есть кривая изменилась на противоположную, что, вероятно, связано с изменением «жесткости» дутья за счёт рассредоточения его по соплам, поскольку суммарное сечение сопел и расход газа на продувку одинаковы, а также изменением направления истечения струй, так как сопла расположены не вертикально, а под углом 20 градусов. Этим же объясняется уменьшение суммарного количества брызг, уловленных накопителями, при работе фурм с пятисопловым наконечником: на диаграмме интенсивности брызгообразования просматривается небольшой экстремум с максимумом (13,75 г/мин) при 12 калибрах, далее после 20 калибров наблюдается равномерное небольшое увеличение интенсивности брызгообразования до 14,5 г/мин при высоте 40 калибров, что в 3,5-6 раз меньше по сравнению с односопловой фурмой и в 1,5-2,4 раза меньше по сравнению с трёхсопловой фурмой.

При приближении наконечника фурмы к поверхности жидкости интенсивность брызгообразования снижается для фурм с трёх- и пятисопловым наконечниками вследствие более глубокого проникновения газовых струй в жидкость, причём минимальный уровень зафиксирован при расположении наконечника фурмы в точке касания с поверхностью жидкости, когда создаются условия полного затопления газового потока в жидкую среду. При этом в определённых условиях, прежде всего определяемых положением фурмы, в фурменной зоне может формироваться целостный и частично замкнутый (за счёт постоянной инъекции) вихревой поток, определяющий брызгообразование в зоне «А». При этом брызги, сформированные на низких горизонтах зоны, вследствие циклического движения капелек вблизи фурмы, имеют возможность частично или полностью возвращаться в объём основной жидкой среды.

В зоне «А» влияние электрических потенциалов по высоте модели различно по трём горизонтам: от уровня жидкости до 40 калибров – электрические воздействия уменьшали количество жидкости, собранной в пробоотборниках (особенно при положительной полярности на фурме); от 40 до 80 калибров – направление влияния потенциалов изменилось на противоположное, а более 80 калибров – накопление жидкости практически не происходило по всем вариантам. Анализ опытов с подведением потенциалов



**Рис. 2.** Изменение интенсивности брызгообразования в прифурменной зоне (зона «А») в зависимости от высоты размещения наконечника фурмы относительно жидкости при работе фурм с различным количеством сопел по опытным вариантам: 1 – без воздействий, 2 – на фурме отрицательная полярность, 3 – положительная полярность

показал, что при отрицательной полярности на фурме уровень брызгообразования в этой зоне снижается на 5-6 %, 6-9 % и 15-35% при продувке через одно-, трёх- и пятисопловую фурмы соответственно, а при положительной полярности – на 5-8 %, 3-5 % и 5-30 % для продувки через одно-, трёх- и пятисопловую фурмы соответственно. Различие во влиянии электрических воздействий на интенсивность брызгообразования при изменении количества сопел в наконечнике фурмы можно объяснить тем, что чем меньше сопел, тем интенсивнее происходит раздробление жидкости, образуется водно-солевой туман, на который оказывает воздействие наведенный на фурму электрический потенциал, который, заряжая эти частицы, способствует их укрупнению и возврату в водно-солевую ванну, то есть, чем выше силовое воздействие газовых струй от фурмы на процесс образования брызг, тем в большей степени проявляется эффект уменьшения разбрызгивания за счёт электрических воздействий.

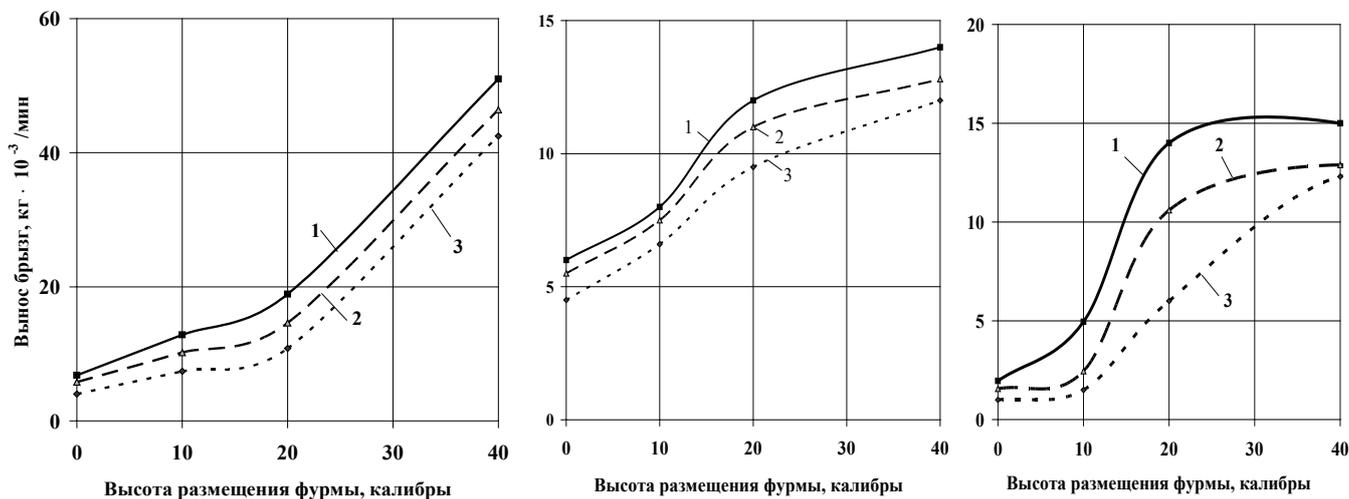
Исследование количества брызг, попадающих в пристеночную область модели (зона «Б») показало, что с увеличением высоты размещения фурмы над ванной количество выносимых капель в направлении стенки модели существенно возрастает. Отмечено, что применение электрических воздействий уменьшает суммарное накопление в пробоотборниках, вынесенных в пристеночную зону, капель по сравнению с обычными продувками. Наблюдаемые эффекты могут быть пояснены известным влиянием электрических потенциалов на величину поверхностного натяжения на границе газ-жидкость, а также изменением угла отражения газожидкостного потока от поверхности расплава в сторону стенки [5-7], что и служит, вероятно, причиной изменения как характера формирования, так и направления движения отражённых с верхней части гребня лунки газожидкостных потоков. Так в работе [7] показано, что при подводе разности высоковольтных потенциалов к электроду, размещённому в газовой струе, истекающей из цилиндрической насадки, и к корпусу продувочного модуля, газовый поток существенно расширился, и изменялся профиль

самой струи (в данном случае сравнение правомерно, поскольку удельная проводимость газового потока в тысячу раз меньше, чем проводимость водно-солевого тумана, сформированного в подфурменной зоне в настоящих опытах).

Что касается выноса капель жидкости за пределы модели (зона «В»), то интенсивность выноса увеличивалась с увеличением высоты расположения продувочной фурмы над уровнем жидкости (рис. 3). Следует отметить, что при увеличении числа сопел в наконечнике фурмы интенсивность выноса капель снижалась с 8-50 г/мин при использовании односоплового наконечника до 6-15 г/мин – в случае применения трёхсоплового и до 2-15 г/мин – пятисоплового наконечников. Из диаграммы видно, что при подъёме фурмы выше 20 калибров меняется угол наклона кривых к оси «х»: для односопловой фурмы угол наклона увеличивается, интенсивность брызгообразования растёт быстрее при дальнейшем подъёме фурмы, а для фурм с трёх- и пятисопловым наконечниками, угол наклона наоборот уменьшается, то есть рост интенсивности разбрызгивания при дальнейшем подъёме тормозится.

Установленные эффекты поясняются тем, что при расположении фурмы высоко над уровнем жидкости капли брызг, сформированные в подфурменной зоне, подхватываемые аэродинамическими потоками «жёсткого» дутья при использовании фурмы с односопловым наконечником, активно выносятся за пределы модели, а в случае увеличения количества сопел меняется и аэродинамика движения потоков, тормозящая рост интенсивности брызговыделения при высоком положении фурмы.

Изучение особенностей влияния электрических воздействий в этой зоне показало его позитивное влияние на снижение интенсивности выноса брызг за пределы модели на всём диапазоне расположения фурмы для трёх изученных конструкций наконечников, причём наиболее сильное влияние оказывает положительная полярность потенциала, особенно в случае применения пятисоплового наконечника:



**Рис. 3.** Изменение интенсивности брызгообразования в прифурменной зоне (зона «А») в зависимости от высоты размещения наконечника фурмы относительно жидкости при работе фурм с различным количеством сопел по опытным вариантам: 1 – без воздействий, 2 – на фурме отрицательная полярность, 3 – положительная полярность

изменение интенсивности брызгообразования при подъёме фурмы на уровне от 1 до 12 г/мин против 1,5...15 г/мин в вариантах 1 и 2 соответственно.

### Выводы

Эксперименты по физическому моделированию ЛД-процесса качественно и количественно подтвердили общеизвестные для прифурменной зоны тенденции влияния основных дутьевых параметров на уровень разбрызгивания в конвертерной ванне и позволили установить аналогичное влияние указанных параметров на брызгообразование в пристеночной зоне модели и выносы брызг за её пределы.

Установлено, что интенсивность брызгообразования изменяется по радиусу модели в зависимости от расстояния от фурменного устройства и по высоте её рабочего объёма, отличаясь количественно в десятки раз между нижним и верхним горизонтами.

Установлен экстремальный характер интенсивности брызгообразования в зависимости от высоты расположения фурмы с выраженными противоположными по направленности действия экстремумами для фурм с односопловым (минимум при 20 калибрах) и трёхсопловым (максимум при 18 калибрах) наконечниками и слабо выраженным экстремумом для фурмы с пятисопловым наконечником (при 10 калибрах), что поясняется различием в «жесткости» дутья, а также структурой истекающей из цилиндрических сопел струй.

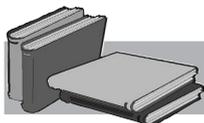
Установлено, что каждый тип полярности потенциалов снижает интенсивность разбрызгивания жидкости в изучаемых зонах модели (отрицательная по-

лярность в большей мере уменьшает интенсивность брызгообразования при использовании фурм с одно-трёхсопловыми наконечниками, а положительная – с пятисопловым наконечником) и количество выносов за её пределы (в большей мере уменьшает положительная полярность на фурме).

Установлено, что в прифурменной зоне модели направление влияния электрических потенциалов на интенсивность брызгообразования по высоте модели изменяется по трём горизонтам: на первом – от уровня жидкости до среза наконечника фурмы электрические воздействия уменьшают количество брызг по сравнению с продувкой без воздействий; на втором, расположенном выше среза наконечника, – на величину, равную расстоянию от фурмы до жидкости, направление влияния потенциалов изменяется на противоположное; на третьем горизонте, расположенном на уровне двойной высоты расположения фурмы вдоль её корпуса и выше, направление влияния потенциалов аналогично первому горизонту, причём влияние на первом горизонте количественно превосходит уровни влияния на остальных горизонтах.

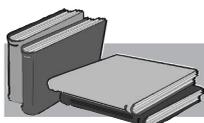
Предложен вероятный механизм установленного (вышеуказанного) эффекта, связанный с особенностями распространения электрического тока в модели по цепи горизонтов.

Выполненные на физической модели эксперименты при продувке солевых водных растворов газами с использованием электрических потенциалов показали возможность расширения области применения низковольтных электрических потенциалов на процессы, не связанные с металлургией.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Охотский В. Б. Гидродинамическая модель конвертера // Известия ВУЗов. Чёрная металлургия. – 1996. – № 3. – С. 10-14.
2. Чернятевич А. Г., Шишов Б. И. Некоторые вопросы распространения кислородных струй в рабочем пространстве конвертера // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1981. – № 1. – С. 28-29.
3. Ken-Ichiro Naito. Behavior of top blowing lance jet in BOF // Nippon Steel Technical Report № 4. – 2013. – P. 33-41.
4. Применение электрической энергии малой мощности при выплавке стали в конвертерах / С. И. Семькин, В. Ф. Поляков, Ю. Н. Борисов [и др.] // Труды первого конгресса сталеплавильщиков, Москва, 12-15 октября 1992 г. – М.: Черметинформация. – 1993. – С. 55-57.
5. Семькина Т. С., Семькин С. И. Влияние полярности налагаемого на конвертерную ванну электрического потенциала на состояние и химический состав шлакового расплава // Фундаментальные и прикладные проблемы чёрной металлургии. – 2008. – выпуск 15. – С. 125-129.
6. Степанов В. П. Межфазные явления в ионных солевых расплавах – Екатеринбург: Наука, 1993. – 316 с.
7. Степанов Е. М., Дьячков Б. Г. Ионизация в пламени и электрическое поле. – М.: Металлургия, 1968. – 312 с.



## REFERENCES

1. Okhotskii V. B. (1996). Hidrodinamicheskaia model' konvertera. [Hydrodynamic converter model]. Izvestiia VUZov. Chernaia Metallurgiiia. № 3, pp. 10-14. [in Russian].
2. Cherniatevich A. G., Shishov B. I. (1981). Nekotorye voprosy rasprostraneniia kislorodnykh strui v rabochem prostranstve konvertera. [Some problems in the oxygen jets in the working space of the converter]. Izvestiia VUZov. Chernaia Metallurgiiia. №1, pp. 28-29. [in Russian].
3. Ken-Ichiro Naito (2013). Behavior of top blowing lance jet in BOF. Nippon Steel Technical Report, 104, pp. 33-41. [in English].
4. Semykin S. I., Poliakov V. F., Borisov Yu. N. (1993). [] Primenenie elektricheskoi energii maloi moshchnosti pri vyplavke stali v konverterakh. [The use of low-power electrical energy in steel production in converters]. Trudy pervogo kongressa staleplavil'shchikov, Moskow, 12-15 October, 1992. Moscow: Chermetinformaciia, pp. 55-57. [in Russian].
5. Semykina T. S., Semykin S. I. (2008). Vliianie poliarnosti nalagaiemogo na konverternuiu vannu elektricheskogo potentsiala na sostoiianie i khimicheskii sostav shlakovogo rasplava. [Influence of polarity imposed on converting a bath of the electric potential on the state and the chemical composition of molten slag]. Fundamental'nye i prikladnye problemy chernoi metallurgii. Issue 15, pp.125-129. [in Russian].
6. Stepanov V. P. (1993). Mezhfaznye yavleniia v ionnykh solevykh rasplavakh. [Interfacial phenomena in ionic salt melts]. Ekaterinburg: Nauka,. [in Russian].
7. Stepanov E. M., D'iachkov B. G. (1968). Ionizatsiia v plameni i elektricheskoe pole. [Ionization of flame and electric field]. Moscow: Metallurgiiia. [in Russian].

### Анотація

*Семикін С. І., Голуб Т. С., Семикіна Є. В., Дудченко С. А., Вакульчук В. В.*

Вивчення впливу низьковольтного потенціалу на характер розбризкування рідини при її продувці зверху шляхом фізичного моделювання

*Наведено результати лабораторних досліджень на фізичній моделі ЛД-процесу впливу дуттєвих режимів на характер розбризкування рідкого середовища всередині моделі, а також на винос крапель за її межі при продувці зверху. Встановлено особливості впливу зовнішніх низьковольтних потенціалів на процес розбризкування рідини при різних дуттєвих режимах. Показано можливість зниження виносу крапель рідини за межі моделі, особливо при підключенні до фурми позитивної полярності джерела струму.*

### Ключові слова

*фізичне моделювання, продування рідкого середовища, фурменні модулі, низьковольтний потенціал*

---

**Summary**

*Semykin S. I., Golub T. S., Semykina E. V., Dudchenko S. A., Vakulchuk V. V.*

Research of the influence of low potential on behavior of splashing of liquid when it top blowing by physical simulation

*Results of laboratory research in the LD converter physical model are given on studying of influence of the blowing modes on the behavior of liquid splashing inside a model, and also on removal of drops out of model at a top blowing. Nature of influence of external low-voltage potentials on the process of liquid splashing is established by various blowing modes. Is shown the possibility of decrease in liquid drops removal out of model, especially when positive polarity of source is connected up to the tuyere.*

**Keywords**

*physical simulation, blowing of the liquid medium, tuyere modules, low-voltage potential*

Поступила 17.06.2016