



УДК 669.162.25

Д.В. СТАЛИНСКИЙ, д.т.н., генеральный директор,

Г.М. КАНЕНКО, к.т.н., ведущий научный сотрудник, **В.В. АЛХАСОВА**, научный сотрудник

УкрГНТЦ «Энергосталь», г. Харьков

В.И. БОЛЬШАКОВ, д.т.н., чл.-корр. НАН Украины, директор, **Г.Н. ГОЛУБЫХ**, младший научный сотрудник

ИЧМ НАН Украины, г. Днепропетровск

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ОЧИСТКА ДОМЕННОГО ГАЗА

Газовая утилизационная бескомпрессорная турбина (ГУБТ) предназначена для производства электрической энергии за счет избыточного давления доменного газа.

Для стабильной работы ГУБТ требуется реконструкция системы очистки газов с достижением конечной запыленности доменного газа 4 мг/м^3 . Скруббер высокого давления обеспечивает охлаждение и очистку от крупной пыли доменного газа. Для доочистки газа от высокодисперсной возгонной пыли необходима установка высоконапорных регулируемых труб Вентури с гидравлическим сопротивлением 15–20 кПа и удельными расходами воды 0,5–1,0 л/м³.

доменный газ, выработка электроэнергии, газоочистка, скруббер, труба Вентури

При совершенствовании технологии производства и формировании рационального топливно-энергетического баланса предприятий, включающего утилизацию отходящих газов, необходимо уменьшение энергозатрат для повышения конкурентоспособности отечественной металлопродукции. Газовая утилизационная бескомпрессорная турбина (ГУБТ) предназначена для производства электрической энергии за счет избыточного давления доменного газа. Развиваемая турбиной мощность зависит от режима работы доменной печи, расхода и давления проходящего через турбину газа. ГУБТ эффективно работают на металлургических предприятиях Германии, Франции, Голландии, Японии, установлены и проектируются для металлургических предприятий России.

ГУБТ радиального и осевого типа производятся в России, Японии, их производство начато и в Украине. В настоящее время в России изготавливаются ГУБТ двух

конструкций. ГУБТ, производимая ОАО «Уральский турбинный завод» (УТЗ), – осевая, двухступенчатая, может поставляться как с газоподогревателем, так и без него (табл. 1). Четырнадцать турбин различной мощности, выпущенных УТЗ, были установлены на предприятиях СНГ, в Украине работало четыре.

Новые турбины радиального типа разработаны ОАО «Невский завод» (НЗЛ), их характеристики представлены в табл. 2.

В последние годы УТЗ усовершенствовало систему смыва отложений и конструкцию подогревателей. Эффективная система смыва на турбинах радиального типа НЗЛ предотвращает образование отложений на лопатках турбины и позволяет турбине эффективно работать при повышении температуры газа перед ней до 50–60 °С, что исключает необходимость установки смешивающего подогревателя. Различные модификации ГУБТ, которые могут эксплуатироваться без подогревателя при повышении температуры газа до 60 °С, выпускаются фирмами «Кавасаки Сэйтэцу» и «Мицуи

**Таблица 1 – Параметры ГУБТ
ОАО «Уральский турбинный завод»**

Наименование	ГУБТ-6М		ГУБТ-8М		ГУБТ-12М	
	а	б	а	б	а	б
Мощность на муфте вала турбины, МВт	6	5	8	7	12	10
Расход газа при нормальных условиях, тыс. м ³ /час	240	270	260	290	360	410
Давление доменного газа перед турбиной (абс.), МПа	0,26	0,26	0,3	0,3	0,33	0,33
Температура доменного газа перед турбиной, °С	120	40	120	40	140	40

Таблица 2 – Параметры ГУБТ ОАО «Невский завод»

Наименование	ГУБТ-12	ГУБТ-16	ГУБТ-25
Мощность на муфте вала турбины, МВт	11,5	15,4	22,5
Расход газа при нормальных условиях, тыс. м ³ /час	450	700	900
Давление доменного газа перед турбиной (абс.), МПа	0,31	0,26	0,304
Температура доменного газа перед турбиной, °С	50	50	40

Инжиниринг Шипбилдинг» (Япония) и также могут быть рассмотрены для внедрения на металлургических предприятиях Украины.

В настоящее время в Украине эксплуатируется около 40 доменных печей (ДП), имеющих объем 1386 м³ и выше, которые могут быть оборудованы ГУБТ для выработки электроэнергии. В Институте черной металлургии НАН Украины (ИЧМ) под руководством академика АН УССР З. И. Некрасова выполнялся комплекс работ по совершенствованию технологии доменной плавки, важной составной частью которой являлось уменьшение энергозатрат на выплавку чугуна. В крупных промышленных масштабах велись исследования по изучению работы ДП с повышенным давлением газа на колошнике, применением природного газа и комбинированного дутья, использованием сырьевых материалов улучшенного качества. Доказана целесообразность строительства доменных печей большого объема и оснащения их бесконусными загрузочными устройствами (БЗУ) для улучшения технико-экономических показателей работы и уменьшения расхода энергоносителей.

Трудности обеспечения эффективной работы ранее установленных ГУБТ вызваны низким качеством железорудных материалов, несовершенством конструкции конусных загрузочных устройств, режимами работы доменных печей с пониженным давлением газа на колошнике (менее 0,15 МПа (изб.)). Важным фактором, влияющим на эффективность работы ГУБТ, является применение БЗУ, способных стабильно поддерживать давление газа на колошнике ДП до 0,2 МПа (изб.). При переходе печей на работу с повышенным давлением газа вынос колошниковой пыли сокращается на 35–50 % [1, 2].

Опыт эксплуатации ГУБТ в странах СНГ показывает, что снижение эффективности их работы связано не только с невысоким давлением газа на колошнике, но и пропуском (до 40 %) доменного газа через дроссельную группу, несовершенством систем очистки доменного газа. На ДП № 5 ОАО «Северсталь» установлены быстродействующие плотнокроющие клапаны, которые позволяют весь доменный газ направлять на ГУБТ, в этом случае пропуск доменного газа через дроссельную группу отсутствует. Новая конструкция ГУБТ радиально-го типа мощностью 25 МВт производства НЗЛ успешно работает на влажном газе. Как показал опыт ее эксплуатации на ДП № 5 ОАО «Северсталь», температура влажного доменного газа перед ГУБТ может быть повышена от 40 °С (проектные значения) до 55–65 °С с увеличением вырабатываемой мощности на 10–18 % за счет повышения массового расхода и влагосодержания газа перед ГУБТ, выделения скрытой теплоты парообразования при конденсации водяных паров в турбине [3].

При обеспечении стабильной работы доменных печей и повышении давления доменного газа на колошнике до 0,18–0,22 МПа (изб.) экономическая эффективность ГУБТ зависит от инвестиций на ее установку и количества вырабатываемой электроэнергии. Расчет мощности ГУБТ для доменных печей объемом от 1386 м³ до 5000 м³ проведен при давлении газа на колошнике не менее 0,18 МПа (изб.), температуре газа перед ГУБТ 60 °С, потерях давления в газоочистке 0,022 МПа, избыточном давлении чистого доменного газа 0,011 МПа (изб.) (табл. 3). Укрупненный расчет мощности ГУБТ проводится по полнотропному процессу с учетом конденсации водяных паров, приняты значения: КПД турбины – 0,86, КПД турбогенератора – 0,975.

Таблица 3 – Значения мощности, вырабатываемой ГУБТ

Параметр	Режимы работы печей					
	1386	1513	1719	2000	2700	5000
Объем печи, м ³	1386	1513	1719	2000	2700	5000
Расход газа, приведенный к нормальным условиям, тыс. м ³ /час	220	240	270	310	370	800
Давление газа на колошнике (изб.), МПа	0,18	0,18	0,2	0,2	0,22	0,22
Мощность, МВт	5,1	5,6	6,8	7,8	9,4	21,6
Годовая выработка электроэнергии, млн кВт	43,7	48,0	58,3	66,8	83,1	187,7
Себестоимость 1000 кВт · ч, грн	89	81	84	73	69	60

В соответствии с растущими ценами на природный газ и электроэнергию окупаемость установки ГУБТ для доменных печей Украины составляет от 2 до 3 лет, для печей большего объема срок окупаемости меньше, при этом полученная стоимость электроэнергии во много раз ниже отпускной цены на нее.

Для стабильной работы ГУБТ требуется реконструкция системы очистки газов с достижением конечной запыленности доменного газа 4 мг/м³. В настоящее время на газоочистку подается колошниковый газ с запыленностью 10–20 г/м³ и начальной температурой 150–350 °С. Анализ удельных показателей выноса колошниковой пыли, проведенный УкрГНТЦ «Энергосталь» по 10 металлургическим предприятиям Украины, показал, что они составляют 35–45 кг/т чугуна, и это более чем в 2 раза превышает европейские показатели (17,5 кг/т). Колошниковая пыль по химическому составу близка к составу шихты и содержит до 35–45 % Fe_{общ.} Система очистки газов, устанавливаемая на доменных печах, состоит из сухого радиального пылеуловителя и скруббера, улавливающих



крупную пыль, трубы Вентури и дроссельной группы для улавливания высокодисперсной пыли.

Поскольку сухая колошниковая пыль полностью утилизируется, необходимо увеличить эффективность ее улавливания. При реконструкции доменных печей целесообразно после радиального пылеуловителя добавить циклон для повышения эффективности улавливания пыли. Как показали испытания, проведенные УкрГНТЦ «Энергосталь» на ЗАО «Донецксталь» – МЗ [4], при установке дополнительного циклона эффективность улавливания сухой колошниковой пыли увеличивается с 50–55 % до 75–77 % и вдвое уменьшается пылевая нагрузка на скруббер. При полной утилизации сухой колошниковой пыли в агломерационном производстве и цементной промышленности важным является уменьшение практически вдвое количества мокрых шламов, направляемых в шламонакопители.

Скруббер высокого давления обеспечивает охлаждение и доочистку от крупной пыли доменного газа. Для эффективного использования доменного газа требуется достижение максимальной его калорийности и влагосодержания не более 50 г/м^3 , поэтому доменный газ необходимо охладить в скруббере от $150\text{--}350 \text{ }^\circ\text{C}$ до $45\text{--}50 \text{ }^\circ\text{C}$, учитывая последующее охлаждение до $35\text{--}40 \text{ }^\circ\text{C}$ в трубах

Вентури и дроссельной группе. При испытаниях скруббера с нижним подводом газа [5] было определено, что процессы теплообмена в скруббере можно разделить на три зоны: 1-я зона – внизу скруббера, в ней происходит охлаждение газа, испарение воды и насыщение газа до 100 % влажности; 2-я зона – в средней части скруббера, в ней нагревается вода и начинается процесс конденсации водяных паров; 3-я зона – в верхней части скруббера, в ней температура и влагосодержание газа уменьшаются, поскольку идет интенсивная конденсация водяных паров (рис. 1). Необходимо отметить, что температура подаваемой воды $20\text{--}25 \text{ }^\circ\text{C}$ предопределила небольшие удельные расходы воды на скруббер $1,5\text{--}2,5 \text{ л/м}^3$ и плотность орошения $10\text{--}20 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$. Уже на расстоянии 5 м от места подачи воды газ охлаждается до температуры «точки росы» и максимального значения влагосодержания [5]. В средней зоне процесс охлаждения газа протекает менее эффективно, коэффициент теплообмена в этой зоне в несколько раз меньше, чем в верхней и нижней зонах, что обуславливает возможность уменьшения высоты скруббера. В результате испытаний было получено увеличение коэффициента теплообмена в скруббере при увеличении скорости газа от $0,93 \text{ м/с}$ до $1,75 \text{ м/с}$ почти в 3 раза. Подтверждение увеличения коэффици-

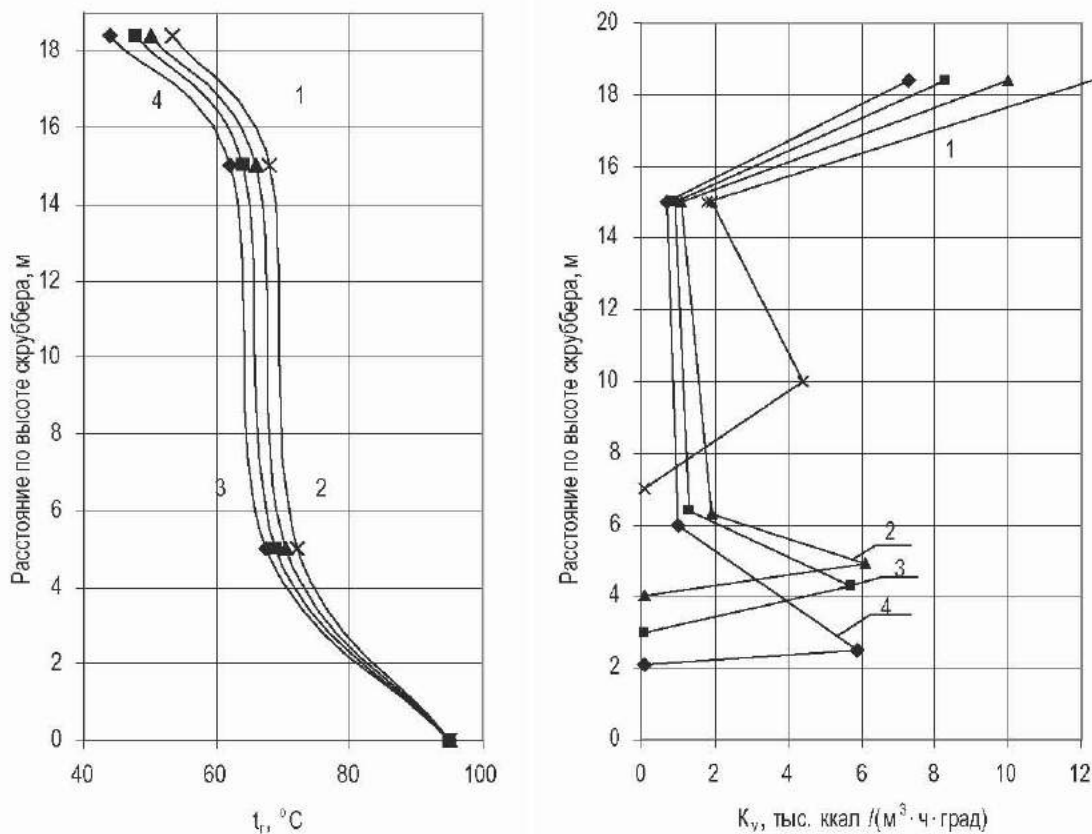


Рисунок 1 – Изменение температуры газа t_g и коэффициента теплообмена K_v по высоте скруббера в режимах:

1 – $Q_g = 300 \text{ м}^3/\text{ч}$; 2 – $Q_g = 350 \text{ м}^3/\text{ч}$; 3 – $Q_g = 400 \text{ м}^3/\text{ч}$; 4 – $Q_g = 450 \text{ м}^3/\text{ч}$

ентов теплообмена до $1300 \text{ ккал/м}^3 \cdot \text{град}$ при повышении скорости до $1,7\text{--}2,0 \text{ м/с}$ в скруббере было получено при внедрении УкрГНТЦ «Энергосталь» газоочистки на ДП № 2 Руставского металлургического завода [6].

При установке ГУБТ работа скруббера по режимам охлаждения газа изменяется, поскольку температура газа после скруббера должна быть повышена от $45\text{--}50 \text{ }^\circ\text{C}$ до $65\text{--}68 \text{ }^\circ\text{C}$. Это возможно при реконструкции системы орошения скруббера, уменьшении расхода или увеличении температуры воды.

В настоящее время режимы охлаждения газа в скрубберах существенно отличаются от оптимальных. Режимные параметры работы скрубберов с применением ГУБТ и без нее по результатам обследования, проведенного УкрГНТЦ «Энергосталь», представлены в табл. 4. Все скрубберы высокого давления имеют нижний подвод газа и оснащены 3–4 ярусами орошения с применением двух- и трехдюймовых эвольвентных форсунок. На ДП № 6 ОАО «Нижнетагильский металлургический комбинат» (НТМК) установлена газоочистка системы «Пауль Вюрт», состоящая из скруббера с верхним подводом газа диаметром $5,6 \text{ м}$ и высотой 15 м , который имеет 11 ярусов орошения, с одной форсункой в центре скруббера с подачей воды вверх и вниз.

Неэффективная работа градирен по охлаждению воды приводит к увеличению температуры подаваемой воды до $40 \text{ }^\circ\text{C}$, расхода воды до $3,5\text{--}4,5 \text{ л/м}^3$ и плотности орошения до $40\text{--}50 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{час}$, что повышает коагуляцию капель жидкости и ухудшает протекание процессов теплообмена.

При применении ГУБТ для доочистки газа от высокодисперсной возгонной пыли до конечной запыленности 4 мг/м^3 необходима установка высоконапорных регулируемых труб Вентури с гидравлическим сопротивлением $15\text{--}20 \text{ кПа}$ и удельными расходами воды $0,5\text{--}1,0 \text{ л/м}^3$. Высоконапорные круглые регулируемые

трубы Вентури различных модификаций – «Пауль Вюрт», ОАО «НИИОГАЗ» и ОАО «Гипрогазоочистка», а также УкрГНТЦ «Энергосталь» – имеют регулирующий конус внутри трубы Вентури, за счет передвижения которого изменяются площадь сечения горловины, скорость и гидравлическое сопротивление трубы Вентури.

Общий коэффициент гидравлического сопротивления учитывает как гидравлическое сопротивление «сухой» трубы Вентури, зависящее от геометрических характеристик, так и зависимость от удельного расхода воды. При испытаниях газоочистки, проведенных УкрГНТЦ «Энергосталь» на ДП № 2 ЗАО «Донецксталь» – МЗ с круглой нерегулируемой трубой Вентури высотой 12 м и углами раскрытия конфузора и диффузора 50° и 10° соответственно, были получены значения общего коэффициента гидравлического сопротивления $0,87$. При гидравлическом сопротивлении 9 кПа скорость газа в горловине составила 90 м/с . Конструкции регулируемых труб Вентури с эллиптическим обтекателем ОАО «НИИОГАЗ» и ОАО «Гипрогазоочистка» [7], установленных на доменных печах ОАО «Северсталь», ОАО «Тулачермет» и др., имеют угол раскрытия конфузора 60° , угол раскрытия диффузора – 90° , высоту – до $4,5 \text{ м}$. Большие значения угла раскрытия диффузора приводят к увеличению значения общего коэффициента гидравлического сопротивления в $2\text{--}2,5$ раза. УкрГНТЦ «Энергосталь» разработано несколько модификаций труб Вентури, у которых значения общего коэффициента гидравлического сопротивления практически вдвое меньше, одна из них была внедрена на ДП № 2 Руставского металлургического завода [6], новая конструкция трубы Вентури запроектирована для ДП № 1 ОАО «Тулачермет».

УкрГНТЦ «Энергосталь» предлагает при капитальных ремонтах газоочисток доменного газа модернизацию системы очистки проводить по двум вариантам

Таблица 4 – Параметры работы скрубберов высокого давления

Наименование параметров	ДП № 2, ЗАО «Донецк- сталь» – МЗ»	ДП № 2, ОАО «ЗМК «Запорож- сталь»	ДП № 1, ОАО «Тула- чермет»	ДП № 3, ОАО «Се- версталь»	ДП № 6, ОАО «Нижнета- гильский меткомбинат»	ДП № 5, ОАО «Север- сталь»
Объем доменной печи, м^3	1033	1513	1510	2000	2200	5500
Наличие ГУБТ	нет	нет	нет	ГУБТ-8	ГУБТ-12	ГУБТ-25
Расход газа, тыс. $\text{м}^3/\text{час}$ (н. у.)	180	230	220	320	350	850
Температура газа, $^\circ\text{C}$:	230	300	200	200	240	200
• до скруббера	52	55	50	50	50	65
• после скруббера						
Удельный расход воды, л/м^3 (н. у.)	3,1	2,3	4,09	4,7	3,8	3,06
Плотность орошения, $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{час}$	14,5	15,68	45,9	26,5	54,2	40,08
Скорость газа (факт.), м/с	0,7	1,07	1,56	0,65	1,78	1,58

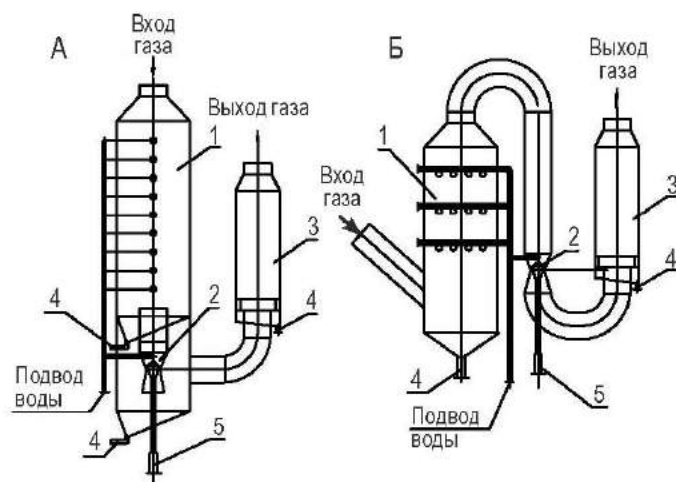


Рисунок 2 – Комплексная система газоочистки

1 – скруббер; 2 – труба Вентури; 3 – каплеуловитель;
4 – отвод шлама; 5 – привод

рис. 2 (А, Б). В варианте А схема очистки проектируется по типу газоочистки «Пауль Вюрт», которая состоит из скруббера с верхним подводом газа и расположенных в нижней части скруббера одной или нескольких труб Вентури. В варианте Б на опускном газоходе за скруббером, работающим с подачей газа снизу, установлена одна или несколько регулируемых труб Вентури с каплеуловителем. В обоих вариантах применяются высокоскоростные скрубберы со скоростью газа до 2 м/с, регулируемые трубы Вентури конструкции УкрГНТЦ «Энергосталь», а также каплеуловители с завихрителями. Компоночные решения и эксплуатационные параметры двух вариантов имеют преимущества и недостатки: в варианте А меньше габариты газоочистки, но усложняются условия эксплуатации системы орошения скруббера и трубы Вентури. В варианте А используются форсунки большой единичной производительности, что, с одной стороны, позволяет работать на более низком давлении воды, с другой стороны, образующиеся более крупные капли ухудшают процесс теплообмена между газом и жидкостью, что приводит к увеличению расхода воды.

Экологическая оценка мероприятия при установке ГУБТ проводится по показателям эмиссии парниковых газов (ПГ), источником образования которых на предприятиях черной металлургии является использование топлива. Применение энергии доменного газа для выработки электроэнергии при установке ГУБТ приводит к экономии природного газа, который был бы израсходован для производства этой электроэнергии. Данные по эмиссии парниковых газов (в пересчете на эквивалент CO_2) при установке ГУБТ рассчитаны по количеству выработанной электроэнергии и количеству сэкономленного природного газа (табл. 5).

Таблица 5 – Эмиссия парниковых газов при установке ГУБТ

Параметр	Режимы работы печей					
	1386	1513	1719	2000	2700	5000
Объем печи, м ³	43,7	48	58,3	66,8	83,1	187,7
Годовая выработка электроэнергии, млн кВт	4,8	5,26	6,39	7,33	8,83	20,3
Количество сэкономленного природного газа, млн м ³ /год	16,3	17,9	21,8	25	30,1	69,1
Уменьшение эмиссии ПГ, тыс. т/год						

ВЫВОДЫ

1. Анализ представленных данных показывает, что установка ГУБТ с выработкой электроэнергии целесообразна. При этом необходимо обеспечить стабильный режим работы доменных печей с давлением газа на колошнике не менее 0,18 МПа (изб.).
2. Для обеспечения необходимой очистки газа требуется замена нерегулируемых труб Вентури на регулируемые. К установке рекомендуются трубы Вентури конструкции УкрГНТЦ «Энергосталь», которые позволяют регулировать расход газа в широком диапазоне изменения параметров работы доменной печи.
3. Экологическая оценка результатов установки ГУБТ проводится по уменьшению эмиссии парниковых газов за счет снижения расхода природного газа, уменьшению вдвое количества шламов, направляемых в шламонакопители, а также возврата сухой уловленной пыли на производство агломерата.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Большаков, В.И.** Перспективы энергосбережения в металлургии Украины [Текст] / В.И. Большаков, Л.Г. Тубольцев // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2007. – № 3. – С. 1–5.
2. **Большаков, В.И.** Оценка эффективности применения газовых утилизационных турбин на доменных печах Украины [Текст] / В.И. Большаков, Н.Г. Голубых, А.И. Лаврик, Д.В. Сталинский, Г.М. Каненко // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2007. – № 6. – С. 7–11.
3. **Степанов, В.М.** Газовая утилизационная бескомпрессорная турбина мощностью 25 МВт и ее технико-экономические показатели [Текст] / В.М. Степанов и др. // Турбины и компрессоры. – 2005. – № 1. – С. 22–27.
4. **Сталинский, Д.В.** Оптимизация конструкций газоочисток доменного газа [Текст] / Д.В. Сталинский, Г.М. Каненко,

- В.В. Алхасова // Химическая техника. – 2006. – № 11. – С. 36–37.
5. Ермолаев, В.Н. Изучение теплообмена высокого давления в скруббере [Текст] / В.Н. Ермолаев // Сталь. – 1972. – № 8. – С. 769–771.
 6. Сталинский, Д.В. Совершенствование работы газоочисток доменного газа [Текст] / Д.В. Сталинский, Г.М. Каненко, В.В. Алхасова // Металлургическая и горно-рудная промышленность. – 2005. – № 5. – С. 79–81.
 7. Дубинская, Ф.Е. Скрубберы Вентури с регулируемым сечением горловины. Конструкции, расчет, применение [Текст] / Ф.Е. Дубинская // Обзорная информация. ЦИТИ ХИМНЕФТЕМАШ. – М. : 1988. – Сер. ХМ-14. – 39 с.

Поступила в редакцию 01.10.07 г.

Газова утилізація безкомпресорної турбіни (ГУБТ) призначена для виробництва електричної енергії за рахунок надлишкового тиску доменного газу.

Для стабільної роботи ГУБТ необхідна реконструкція системи очистки газів с досягненням кінцевої запиленості доменного газу 4 мг/м^3 . Скрубер високого тиску є одним із основних елементів газоочистки, який забезпечує охолодження та очистку від крупного пилу доменного газу. Для доочистки газу від вискодисперсного взгонного пилу необхідна установка високонапірних регульованих труб Вентурі з гідравлічним опором 15–20 кПа та питомими витратами води $0,5\text{--}1,0 \text{ л/м}^3$.

Gas recovery compressorless turbine (GRCT) aims at power generation due to excess pressure of blast-furnace gas. To ensure stable work of GRCT, it is necessary to modernize the gas cleaning system to secure final dust content in blast-furnace gas of 4 mg/m^3 . The scrubber of high pressure provides cooling and cleaning against coarse dust of blast-furnace gas. For additional gas cleaning against superfine sublimation dust, it is necessary to install high-pressure adjustable Venturi tubes with hydraulic resistance of 15–20 kPa and specific discharge of water at the rate $0,5\text{--}1,0 \text{ l/m}^3$.