

COMBINED-CYCLE GAS PLANT WITH A HEAT RECOVERY BOILER AND EVAPORATORS FOR INSTANT BOILING OF FEED WATER

A. N. Grishin ^a, V. A. Slesarev ^b

Ufa State Aviation Technical University (UGATU)

^a *grishin1152@mail.ru*, ^b *VASSAV55@mail.ru*

Submitted 2022, October 28

Abstract. Combined-cycle gas plants (CCGT) with a heat recovery boiler (CU) are heat engines whose efficiency is of the greatest importance (up to 57 %) compared to other types of heat engines, including, in particular, PTU, GTU, internal combustion engines. At present, some experience has been accumulated in the operation of CCGT, which indicates the operational disadvantages of CCGT, in particular, the insufficiently high reliability of heat recovery boilers associated with the formation of scale on the heated surfaces of evaporators, leading to thermal and hydraulic deployment of a system of parallel pipes with natural circulation of boiling water. The article considers the thermal scheme of a CCGT with CU and evaporators of instantaneous boiling of feed water, which allows to eliminate these disadvantages.

Keywords: combined-cycle gas plant; heat recovery boiler; feed water; evaporator; instant boiling; heat exchange surfaces.

ПАРОГАЗОВАЯ УСТАНОВКА С КОТЛОМ-УТИЛИЗАТОРОМ И ИСПАРИТЕЛЯМИ МГНОВЕННОГО ВСКИПАНИЯ ПИТАТЕЛЬНОЙ ВОДЫ

А. Н. Гришин ^а, В. А. Слесарев ^б

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

^а *grishin1152@mail.ru*, ^б *VASSAV55@mail.ru*

Поступила в редакцию 28.10.2022

Аннотация. Парогазовые установки (ПГУ) с котлом-утилизатором (КУ) представляют собой тепловые двигатели, у которых КПД имеет наибольшее значение (до 57 %) по сравнению с другими типами тепловых двигателей, включая, в частности, ПТУ, ГТУ, ДВС. В настоящее время накоплен некоторый опыт эксплуатации ПГУ, который свидетельствует об эксплуатационных недостатках ПГУ, в частности, недостаточно высокой надежности котлов-утилизаторов, связанной с образованием накипи на обогреваемых поверхностях испарителей, ведущей к тепловой и гидравлической разверке системы параллельных труб с естественной циркуляцией кипящей воды. Рассматривается тепловая схема ПГУ с КУ и испарителями мгновенного вскипания питательной воды, позволяющая устранить указанные недостатки.

Ключевые слова: парогазовая установка; котел-утилизатор; питательная вода; испаритель; мгновенное вскипание; поверхности теплообмена.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в теплоэнергетике наибольшее распространение получили парогазовые установки (ПГУ) с котлом-утилизатором (КУ). В КУ большая часть теплоты выходных газов газотурбинной установки (ГТУ) используется для нагрева и испарения рабочего тела паротурбинной установки (ПТУ). Испарение воды происходит в системе труб, расположенной внутри КУ, за счет пузырькового кипения вблизи обогреваемых поверхностей. Относительное количество труб в испарителях барабанного КУ докритического давления пара составляет значительную величину. Например, в КУ типа П-88 (АО ПНЗ), относительное количество труб в двух испарителях составляет приблизительно 54,3 % от общего количества труб в котле. Для подобной конструкции котла характерны проблемы, связанные с образованием накипи на обогреваемых поверхностях испарителей, с тепловой и гидравлической разверткой системы параллельных труб с естественной циркуляцией кипящей воды.

ТЕПЛОВАЯ СХЕМА ПГУ С КУ И ИСПАРИТЕЛЯМИ МГНОВЕННОГО ВСКИПАНИЯ ПИТАТЕЛЬНОЙ ВОДЫ

Для устранения указанных проблем предложен способ [1]. На основе этого способа разработан один из вариантов тепловой схемы ПГУ с КУ и двумя испарителями мгновенного вскипания питательной воды. Схема установки приведена на рис. 1. В качестве ГТУ использована ГТЭ-110. Она содержит компрессор 1, камеру сгорания 2 и турбину 3. Выходные газы из ГТУ поступают в КУ, выполненный на базе КУ типа П-88 (АО ПМЗ) и имеющий то же количество секций (140): 4 секции в 35 рядах. В предлагаемой конструкции котла отсутствуют барабаны, а также испарители высокого и низкого давления. Первыми по ходу движения газов располагаются перегреватели пара 4, 5 соответственно высокого и низкого давления. Наибольшее количество секций приходится на экономайзер 6. В выходной части КУ располагаются секции газового подогревателя конденсата 7. Нагрев пара и воды в секциях производится за счет прямой вынужденной конвекции.

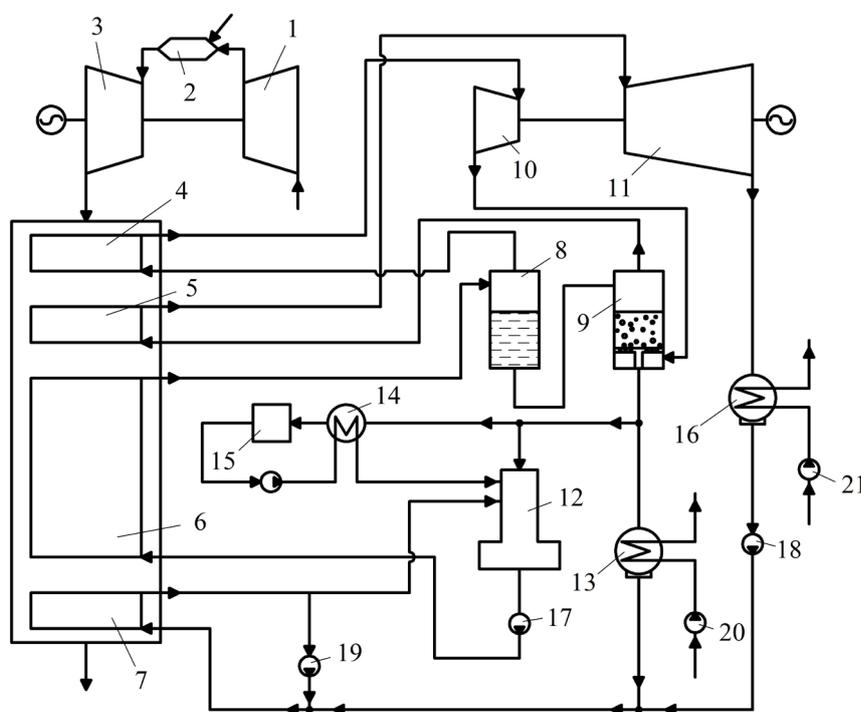


Рис. 1. Тепловая схема ПГУ с КУ и испарителями мгновенного вскипания питательной воды

Испарители мгновенного вскипания 8, 9 соответственно высокого и низкого давления находятся вне проточной части КУ. В испаритель 9 дополнительно, через барботажную тарелку, подается пар из турбины высокого давления 10 для подогрева воды, поступающей из испарителя 8.

Пар, полученный в испарителях 8 и 9 перегревается соответственно в перегревателях 4, 5, а затем расширяется в турбинах 10 и 11 высокого и низкого давления.

Вода из испарителя 9 подается в деаэратор 12, водоводяной теплообменник 13 и водоводяной теплообменник 14 блока химводоочистки 15. Теплота теплообменника 13 используется для собственных нужд.

Отработавший пар поступает в конденсатор 16. С помощью насосов 17 и 18 питательная вода подается в экономайзер 6, а конденсат – в подогреватель конденсата 7. Температура конденсата на входе в подогреватель конденсата регулируется рециркуляционным насосом 19. Насосами 20 и 21 прокачивается вода через водоводяной теплообменник и конденсатор.

ТЕПЛОВАЯ СХЕМА ПГУ С ДВУХКОНТУРНЫМ КУ

В качестве ПГУ, использованной для сравнения, рассмотрена установка, схема которой приведена в [2]. Как и в предлагаемой схеме, применена ГТУ типа ГТЭ-110 и КУ типа П-88 (АО ЛМЗ) с тем же количеством рядов (35) и секций (140). Схема ПГУ приведена на рис. 2. Испарители 6 и 8 соответственно высокого и низкого давления располагаются в проточной части котла. Имеются барабаны 10 и 11 высокого и низкого давления.

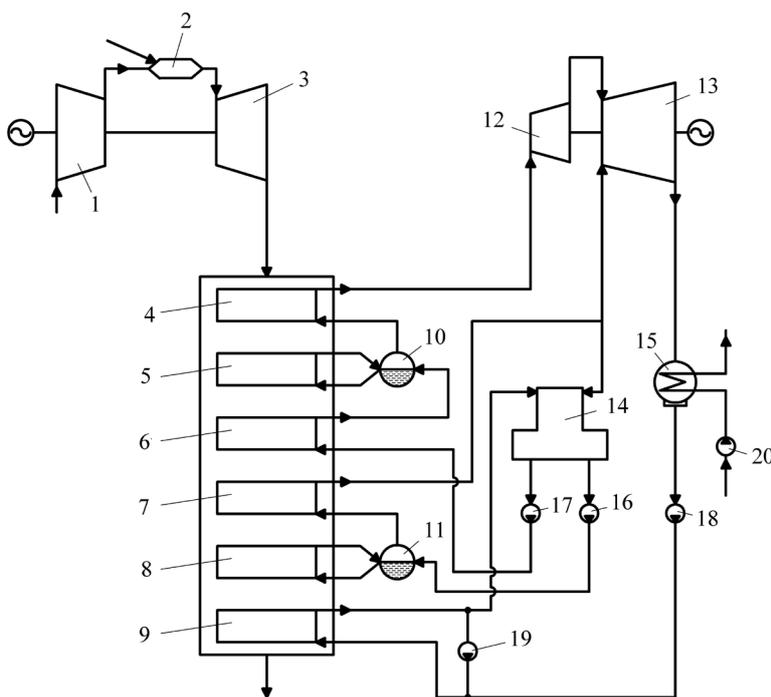


Рис. 2. Тепловая схема ПГУ с двухконтурным КУ (классическая):

- 1 – компрессор ГТУ; 2 – камера сгорания ГТУ; 3 – газовая турбина; 4 – перегреватель пара высокого давления КУ; 5 – испаритель высокого давления КУ; 6 – экономайзер высокого давления КУ; 7 – перегреватель пара низкого давления КУ; 8 – испаритель низкого давления КУ; 9 – газовый подогреватель конденсата КУ; 10 – барабан высокого давления КУ; 11 – барабан низкого давления КУ; 12 – турбина высокого давления; 13 – турбина низкого давления; 14 – деаэратор питательной воды; 15 – конденсатор паровой турбины; 16 – питательный насос контура низкого давления; 17 – питательный насос контура высокого давления; 18 – конденсатный насос; 19 – насос рециркуляции; 20 – насос охлаждающей воды конденсатора

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОВЫХ СХЕМ ПГУ

Гидравлические потери и давления в проточной части ПТУ приняты согласно рекомендациям [2]. Учет влияния влажности на КПД ступеней паровой турбины произведен по методике, предложенной в [3].

Значения основных параметров ПГУ с двухконтурным КУ приведены в табл. 1.

Таблица 1. Значения основных параметров ПГУ с двухконтурным КУ

Температура воздуха на входе в ГТУ, °С	15
Температура газов на выходе из ГТУ, °С	524
Степень сухости пара на выходе из турбины НД	0,8658
Расход газов на выходе из ГТУ, кг/с	362,3
Расход воздуха на входе в ГТУ, кг/с	355,954
Мощность ГТУ, кВт	106479,1
Мощность ПТУ, кВт	54835,4
Мощность ПГУ, кВт	161314,5
КПД ГТУ	0,3352
КПД утилизации теплоты	0,7942
КПД нетто ПТУ	0,3270
КПД ПГУ	0,5078

Параметры КУ типа П-88 приводятся в табл. 2. Значения коэффициентов теплопередачи взяты из [2].

Таблица 2. Параметры КУ типа П-88

Поверхности нагрева	ПЕВД	ИВД	ЭКВД	ПЕНД	ИНД	ГПК
Расход газов, кг/с	362,3					
Температура газов на входе, °С	524	463,57	300,37	242,73	238,56	178,21
Температура газов на выходе, °С	463,57	300,37	242,73	238,56	178,21	111,09
Коэффициент теплопередачи, Вт/(м ² ·°С)	33,4	43,0	38,4	18,3	31,0	34,8
Расход пара/воды, кг/с	43,396	43,396	43,396	11,501	11,501	73,511
Давление пара/воды на входе, МПа	7,6	7,78	8,64	0,73	0,76	0,98
Давление пара/воды на выходе, МПа	7,3	7,6	7,78	0,68	0,73	0,73
Температура рабочего тела на входе, °С	291,45	276,85	160,92	166,65	159,63	60,00
Температура рабочего тела на выходе, °С	475,48	291,45	276,85	228,87	166,65	145,14
Количество секций, шт.	12	40	20	4	36	28
Количество рядов секций, шт.	3	10	5	1	9	7
Давление в деаэраторе, МПа	0,612					
Давление в конденсаторе, МПа	0,0036					

Основные параметры ПГУ с КУ и испарителями мгновенного вскипания приведены в табл. 3.

В ПТУ, входящей в состав предлагаемой ПГУ, давления пара на входе в турбины высокого и низкого давления (см. точки 10 и 12 на рис. 4) имеют оптимальные значения 13,2 МПа и 1,65 МПа. Оптимальность связана с борьбой (балансом) двух факторов – противоположным влиянием на КПД средней температуры подвода теплоты и генерацией пара в испарителях мгновенного вскипания питательной воды. Например, при увеличении давления пара увеличивается средняя температура подвода теплоты и уменьшается количество пара, полученного в испарителях.

Небольшое увеличение КПД и мощности в предлагаемой ПГУ связано с увеличением давления и температуры подогрева пара на входе в турбины высокого и низкого давления – давления, соответственно, в $13,2/7,3 \approx 1,81$ и $1,65/0,68 \approx 2,43$ раза, температуры – $483,42/475,48 \approx 1,017$ и $415,67/228,87 \approx 1,816$ раза, несмотря на уменьшение расхода пара через эти турбины соответственно в 1,326 и 1,153 раза. Дополнительно это связано также с увеличением степени сухости пара на выходе из турбины низкого давления в $0,9152/0,8658 \approx 1,057$ раза.

Таблица 3. Основные параметры ПГУ с КУ и испарителями мгновенного вскипания

Температура воздуха на входе в ГТУ, °С	15
Температура газов на выходе из ГТУ, °С	524
Степень сухости пара на выходе из турбины НД	0,9152
Расход газов на выходе из ГТУ, кг/с	362,3
Расход воздуха на входе в ГТУ, кг/с	355,954
Мощность ГТУ, кВт	106479,1
Мощность ПТУ, кВт	55135,1
Мощность ПГУ, кВт	161614,2
КПД ГТУ	0,3352
КПД утилизации теплоты	0,7622
КПД нетто ПТУ	0,3425
КПД ПГУ	0,5088

Параметры модернизированного КУ (на базе П-88) приводятся в табл. 4.

Таблица 4. Параметры модернизированного КУ (на базе П-88)

Поверхности нагрева	ПЕВД	ПЕНД	ЭКВД	ГПК
Расход газов, кг/с	362,3			
Температура газов на входе, °С	524,00	474,25	419,40	145,01
Температура газов на выходе, °С	474,25	419,40	145,01	128,31
Коэффициент теплопередачи, Вт/(м ² ·°С)	33,4	18,3	38,4	34,8
Расход пара/воды, кг/с	32,723	46,171	68,457	216,237
Давление пара/воды на входе, МПа	13,500	1,700	24,516	0,350
Давление пара/воды на выходе, МПа	13,200	1,650	22,064	0,150
Температура рабочего тела на входе, °С	333,81	204,31	107,60	60,00
Температура рабочего тела на выходе, °С	483,42	415,67	373,95	67,29
Количество секций, шт.	12	16	108	4
Количество рядов секций, шт.	3	4	27	1
Степень сухости в цилиндре испарителя высокого давления	0,4780			
Степень сухости в цилиндре испарителя низкого давления	0,6744			
Давление в деаэраторе, МПа	0,12			
Давление в конденсаторе, МПа	0,0036			

На рис. 3 и 4 показаны Q, t – диаграммы процессов теплообмена в котлах-утилизаторах ПГУ.

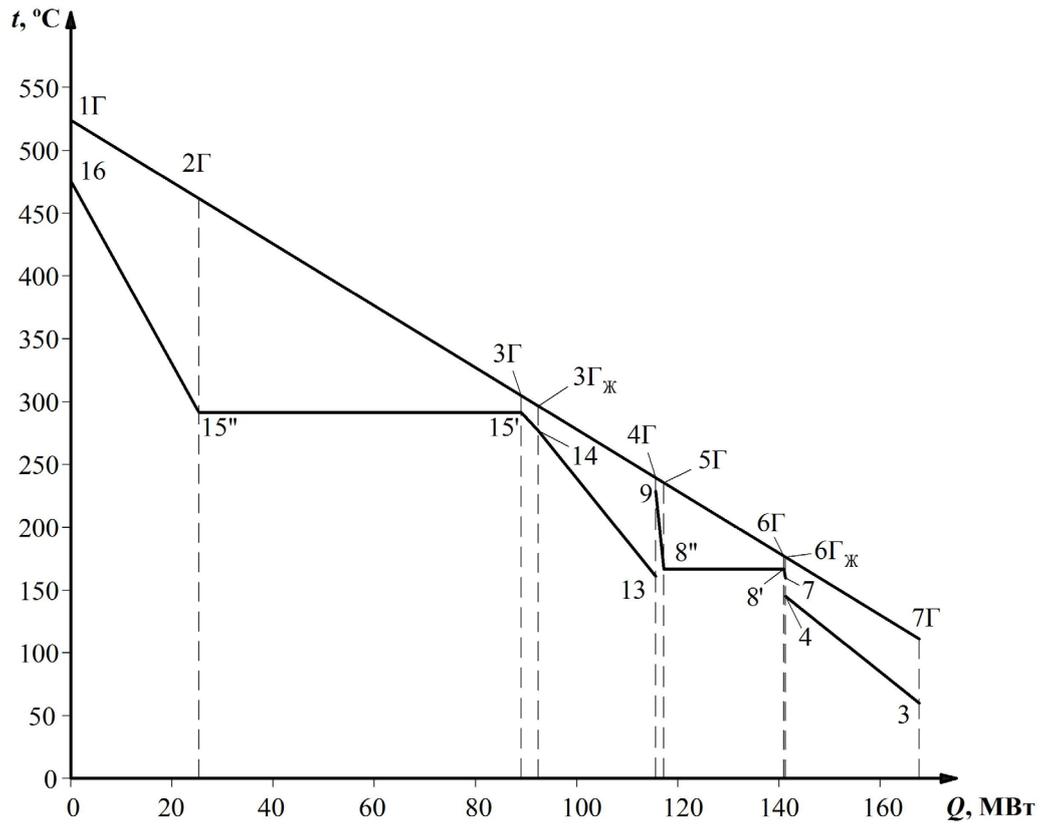


Рис. 3. Q, t – диаграмма теплообмена в двухконтурном котле-утилизаторе

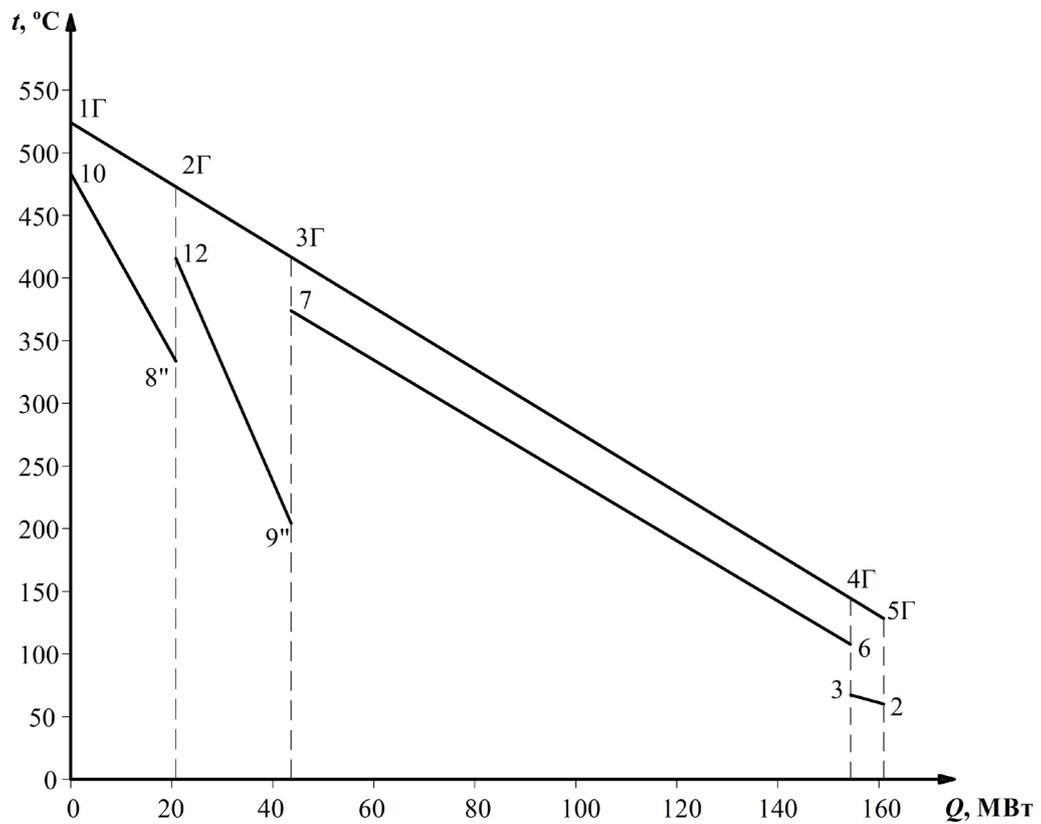


Рис. 4. Q, t – диаграмма теплообмена в модернизированном котле-утилизаторе ПГУ с испарителями мгновенного вскипания питательной воды

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение КУ с испарителями мгновенного вскипания питательной воды позволяет избавиться от проблем, связанных с образованием накипи на поверхностях стенок труб испарителей КУ, с тепловой и гидравлической разверкой системы параллельных труб с естественной циркуляцией кипящей воды. В проточной части КУ по газовой стороне сохраняются только теплообменные поверхности, участвующие в теплообмене на основе вынужденной конвекции. Это упрощает эксплуатацию и снижает стоимость КУ. Мощность и экономичность ПГУ с КУ и испарителями мгновенного вскипания больше соответственно на $\approx 0,19\%$ и $\approx 0,1\%$ (абсолютных).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гришин А. Н., Слесарев В. А.** Способ работы парогазовой установки с котлом-утилизатором и испарителями мгновенного вскипания питательной воды // Патент РФ № 2674822. Оpubл. 13.12.2018. Бюл. № 35. [A. N. Grishin, V. A. Slesarev, "Method of steam gas installation operation with boiler-utilizer and instant boil evaporators of feed water", Patent RF 2674822, 2018.]
2. **Цанев С. В., Буров В. Д., Ремезов А. Н.** Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций. М.: МЭИ, 2002. 584 с. [S. V. Tsanev, V. D. Burov, A. N. Remezov, *Gas turbine and steam-gas installations of thermal power plants*, (in Russian). Moscow: MEI, 2002.]
3. **Маргулова Т. Х.** Атомные электрические станции. М.: Высшая школа, 1978. 360 с. [T. Kh. Margulova, *Nuclear power stations*, (in Russian). Moscow: Vy'sshaya shkola, 1978.]

ОБ АВТОРАХ

ГРИШИН Александр Николаевич, доц. каф. АТиТ, канд. техн. наук. Дипл. инж.-механик (УАИ, 1974).

СЛЕСАРЕВ Виктор Алексеевич, доц. каф. АТиТ, канд. техн. наук. Дипл. инж.-механик (УАИ, 1977).

GRISHIN, Alexander Nikolaevich, Assoc. Prof., Dept. of Atit. Cand. of Tech. Sci. Dipl. Eng.-mechanical (UAI, 1974).

SLESAREV, Victor Alekseevich, Assoc. Prof., Dept. of Atit. Cand. of Tech. Sci. Dipl. Eng.-mechanical (UAI, 1977).

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 26, no. 4 (98), pp. 96-102, 2022. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).