

Исследование закономерностей формирования неравномерности нагрузок на резцах исполнительного органа угледобывающего комбайна

Study of the regularities of non-uniformity of loads formation on the cutters of the executive body of the coal-mining combine harvester

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2024-5-97-101>

Выполнены исследования влияния силовой уравновешенности исполнительного органа на формирование мгновенной толщины стружки (скорости подачи) и влияния числа одновременно контактирующих с забоем резцов на коэффициент вариации нагрузки, обусловленной неравномерностью подачи комбайна. В результате проведенных исследований было установлено, что отраслевой стандарт ОСТ 12.44.109-79, используемый для расчета дисперсии нагрузки на исполнительном органе, обусловленной неравномерностью подачи комбайна, не учитывает влияние на нее средней нагрузки и числа одновременно контактирующих резцов с забоем. Также установлено, что коэффициент вариации суммарной нагрузки, определяемый неравномерностью перемещения комбайна, зависит от средней нагрузки на исполнительном органе и скорости подачи комбайна, снижаясь с ростом момента на валу привода исполнительного органа и увеличивается с ростом скорости подачи. Силовая уравновешенность исполнительного органа не оказывает влияния на величину доли дисперсии нагрузки, обусловленной неравномерностью подачи комбайна.

Ключевые слова: угледобывающий комбайн, исполнительный орган, резец, сила резания, толщина стружки, скорость подачи, коэффициент вариации, неравномерность нагрузок.

Для цитирования: Линник В.Ю., Линник Ю.Н. Исследование закономерностей формирования неравномерности нагрузок на резцах исполнительного органа угледобывающего комбайна // Уголь. 2024;(5):97-101. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-5-97-101.

ЛИННИК В.Ю.

Доктор экон. наук, доцент, профессор
кафедры экономики и управления
в топливно-энергетическом комплексе
Государственного университета управления
Министерства науки и высшего образования,
109542, г. Москва, Россия,
e-mail: vy_linnik@guu.ru

ЛИННИК Ю.Н.

Доктор техн. наук, профессор,
профессор кафедры экономики и управления
в топливно-энергетическом комплексе
Государственного университета управления
Министерства науки и высшего образования,
109542, г. Москва, Россия

Abstract

The research of the influence of the force equilibrium of the executive body on the formation of the instantaneous chip thickness (feed rate) and the influence of the number of cutters simultaneously contacting the face on the coefficient of variation of the load caused by the non-uniformity of the combine harvester feed has been carried out. As a result of the research it was found that the industry standard No. 12.44.109-79 used to calculate the variance of the load on the actuator due to the unevenness of the combine feed does not take into account the influence of the average load and the number of simultaneously contacting cutters with the face. It is also established that the coefficient of variation of the total load determined by the unevenness of the combine harvester movement depends on the average load on the actuator and the feed rate of the combine, decreasing with the growth of the torque on the shaft of the actuator drive and increasing with the growth of the feed rate. Force equilibrium of the actuator does not influence the value of the load dispersion share, determined by the unevenness of the combine harvester feed.

Keywords

Coal-mining combine, actuator, cutter, cutting force, chip thickness, feed rate, coefficient of variation, non-uniformity of loads.

For citation

Linnik V.Yu., Linnik Yu.N. Study of the regularities of non-uniformity of loads formation on the cutters of the executive body of the coal-mining combine harvester. *Ugol'*. 2024;(5):97-101. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2024-5-97-101.

ВВЕДЕНИЕ

Результаты выполненных ранее исследований [1] позволили получить расчетные зависимости, которые легли в основу отраслевого стандарта ОСТ 12.44.109-79 [2], позволившего существенно повысить точность определения спектров действующих нагрузок при выборе параметров угледобывающих комбайнов на стадии их проектирования. Однако практика применения расчетных методов при разработке высоконагруженных трансмиссий современных комбайнов выявила ряд неучтенных факторов, к которым относятся применение бесцепных систем подачи (БСП) различной жесткости, сочетание высоких скоростей подачи с большими нагрузками [3, 4, 5, 6, 7], нарушение схем расстановки режущего инструмента на исполнительных органах из-за частых поломок резов [8]. В этой связи были выполнены исследования закономерностей формирования неравномерности нагрузок на резах исполнительного органа угледобывающего комбайна, целью которых является совершенствование определения спектров нагруженности исполнительных органов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ**1. Оценка влияния силовой уравновешенности исполнительного органа на формирование мгновенной толщины стружки (скорости подачи)**

Для проверки гипотезы о влиянии силовой уравнове-

шенности исполнительного органа, оцениваемой конструктивным коэффициентом вариации суммарной силы резания v_{11} [1, 3, 9], на характер формирования мгновенной скорости подачи комбайна оценивалась совокупность экспериментальных данных, полученных при работе шнека с углом охвата $\gamma_{\text{охв}} = 180^\circ$, при котором его фактическая ширина захвата B_3 изменялась в узком диапазоне значений ($B_3 = 0,71-0,78$). При этом жесткость системы подачи составляла $G'_1 \approx 0,3$ МН/м. Полученные результаты экспериментальных исследований приведены в таблице, где параметр схемы расстановки резов q рассчитывался по формуле:

$$q = 1/k \cdot \sum_{j=1}^k \sqrt{\sum_{i=1}^{n_{p,p}} Z_{ij}^2 / \left(\sum_{i=1}^{n_{p,p}} Z_{ij} \right)^2},$$

где Z_{ij} – усилие на i -ом резе, находящемся в j -ом положении исполнительного органа, число k , которых принималось от 1 до 24; $n_{p,p}$ – число одновременно режущих резов.

Для определения неравномерности нагрузок на исполнительном органе комбайна принят коэффициент вариации суммарной нагрузки σ_{V_n} [10, 11]. Из таблицы следует, что экспериментальные значения коэффициента вариации суммарной нагрузки, определяемые неравномерностью перемещения комбайна $v_{S_{нр}}$ снижаются с ростом момента на валу привода исполнительного органа M (при $V_n = \text{const}$) и увеличиваются с ростом скорости подачи (при $M = \text{const}$).

Дальнейший анализ показал, что между σ_{V_n} и средней скоростью подачи V_n существует тесная линейная связь с коэффициентом корреляции $\rho_{\sigma_{V_n}} = 0,869$. Это обстоятельство указывает на необходимость учитывать влияние V_n при анализе полученных экспериментальных данных с использованием аппарата множественной корреляции. Из выполненного корреляционного анализа следует, что параметры силовой уравновешенности исполнительного органа не оказывают влияния на мгновенную скорость подачи (толщину стружки) при разрушении угольного массива.

Это обстоятельство указывает на то, что увеличение абсолютных значений относительной ошибки $\delta_{v_{п}}$ (см. таблицу) при уменьшении угла охвата $\gamma_{\text{охв}}$ не может быть вызвано ростом (с уменьшением величины $\gamma_{\text{охв}}$) величины конструктивного коэффициента вариации v_{11} , а обусловлено другой причиной, которая будет раскрыта в последующем изложении.

2. Оценка влияния числа одновременно контактирующих с забоем резов на коэффициент вариации нагрузки, обусловленной неравномерностью подачи комбайна

Рассмотрим шнековый исполнительный орган угледобывающего комбайна, находящийся в контакте с разрушаемым угольным массивом (см. рисунок).

Как следует из рисунка, в процессе подачи комбайна стружка, снимаемая резами исполнительного органа, имеет серповидную форму, толщина которой изменяется из-за неравномерности скорости подачи. Неравномерность перемещения (подачи) комбайна вызыва-

Результаты экспериментальных исследований неравномерности нагруженности комбайна при разрушении углещементного блока

Results of experimental studies of the non-uniformity of the load of the shearer during the destruction of the coal-cement block

Средний момент на валу привода исполнительного органа \overline{M} , Н/м	Скорость подачи V_n , м/мин	Коэффициент вариации скорости подачи V_{V_n}	Фактическая ширина захвата исполнительного органа B_s , м	Угол охвата шнеком забоя, $\gamma_{\text{охв}}$, град	Конструктивный коэффициент вариации силы резания $V_{\text{ин}}$	Параметр схемы расстановки резцов q	Экспериментально полученный коэффициент вариации V_{S_n}	Коэффициент вариации V_{S_n} рассчитанный по ГОСТ 12.44.109-79 [2]	Экспериментально полученный коэффициент вариации суммарной нагрузки в трансмиссии к исполнительному органу $V_{\text{тр}}$	Рассчитанный по ГОСТ 12.44.109-79 [2] коэффициент вариации суммарной нагрузки в трансмиссии к исполнительному органу $V_{\text{тр}}$	Относительная ошибка оценки коэффициента вариации суммарной нагрузки в трансмиссии к исполнительному органу от среднего момента \overline{M} на валу привода $\delta_{v_{\text{тр}}}$
11150	1,10	1,25	0,78	180	0,063	0,266	0,374	0,31	0,400	0,34	-0,15
16330	1,70	1,07	0,75	180	0,067	0,275	0,256	0,27	0,295	0,31	0,05
8460	0,55	1,24	0,75	180	0,071	0,267	0,374	0,35	0,401	0,38	-0,05
16040	1,60	1,05	0,74	180	0,111	0,281	0,216	0,28	0,277	0,33	0,19
13140	1,10	1,25	0,74	180	0,111	0,281	0,263	0,31	0,315	0,36	0,14
9090	0,55	1,55	0,76	180	0,094	0,276	0,368	0,35	0,402	0,39	-0,03
17720	1,70	1,16	0,71	180	0,140	0,291	0,217	0,27	0,293	0,33	0,13
7330	0,55	1,80	0,75	180	0,139	0,281	0,432	0,35	0,473	0,40	-0,15
13510	0,92	1,28	0,75	180	0,139	0,281	0,249	0,33	0,315	0,38	0,21
8550	0,57	1,31	0,78	180	0,151	0,276	0,352	0,35	0,405	0,40	-0,01
13810	1,10	1,16	0,74	180	0,157	0,286	0,229	0,31	0,309	0,37	0,2
8290	0,60	2,30	0,72	180	0,073	0,282	0,392	0,35	0,420	0,38	-0,10
12710	1,00	0,93	0,78	180	0,056	0,267	0,266	0,32	0,300	0,35	0,17
10230	0,57	1,66	0,78	180	0,101	0,272	0,354	0,35	0,390	0,39	0,00
13010	1,10	0,92	0,78	180	0,101	0,272	0,309	0,31	0,350	0,35	0,00
7240	1,70	1,10	0,54	120	0,121	0,394	0,716	0,27	0,750	0,35	-0,53
8500	1,50	0,89	0,79	110	0,113	0,339	0,537	0,23	0,572	0,34	-0,41
6270	1,70	1,00	0,60	80	0,153	0,408	0,740	0,27	0,780	0,37	-0,53

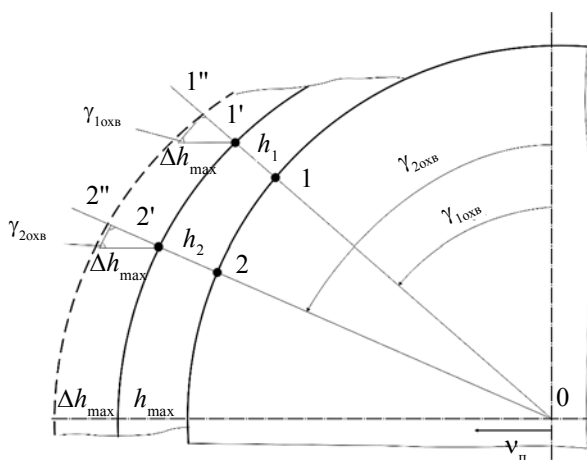


Схема определения коэффициента вариации толщины стружки на резах исполнительного органа:

$\gamma_{1\text{охв}}$, $\gamma_{2\text{охв}}$ – углы охвата исполнительного органа при толщинах стружки h_1 и h_2

A schematic diagram for determining the variation coefficient of chip thickness at the actuator picks: $\gamma_{1\text{охв}}$, $\gamma_{2\text{охв}}$ – angles of the actuator reach at the chip thicknesses of h_1 and h_2

ет вариацию толщины стружки на резах исполнительного органа, которую принято оценивать коэффициентом вариации v_{h_i} . Его величина оценивается исходя из следующих соображений [3, 12, 13]. Для произвольно выбранных для реза исполнительного органа положений 1 и 2 с соответствующими координатами $\gamma_{1\text{охв}}$ и $\gamma_{2\text{охв}}$ при данной средней скорости подачи, определяющей среднюю максимальную толщину стружки h_{max} , средняя толщина стружки h_i равна:

$$h_i = h_{\text{max}} \cdot \sin \gamma_{\text{охв},i}$$

Изменение скорости подачи за некоторый промежуток времени T работы комбайна по сравнению со средней вызывает соответствующее изменение толщины стружек h_1 и h_2 на величины $\Delta h_{\text{max}} \cdot \sin \gamma_{\text{охв},1}$ и $\Delta h_{\text{max}} \cdot \sin \gamma_{\text{охв},2}$. При этом отношение:

$$\frac{\Delta h_{\text{max}}}{h_{\text{max}}} = \frac{\Delta h_{\text{max}} \cdot \sin \gamma_{\text{охв},i}}{h_{\text{max}} \cdot \sin \gamma_{\text{охв},i}} = k$$

сохранится постоянным. Тогда коэффициент вариации толщины стружки также будет оставаться постоянным независимо от положения реза на серповидном срезе, а именно:

$$v_{h_i} = \frac{1}{h_i} \sqrt{\frac{\int_0^T (k \cdot h_i)^2 \cdot f(k) dk}{T}} = \sqrt{\frac{\int_0^T k^2 \cdot f(k) dk}{T}} = \text{const},$$

где T – время работы комбайна; $f(k)$ – плотность вероятности случайной величины $k = k(t)$, определяемая плотностью вероятности скорости подачи.

Если дисперсия нагрузки, определяемая вариацией толщины стружки, зависящей в свою очередь от неравномерности скорости подачи комбайна, для i -ого резца исполнительного органа равна $\sigma_{Z_{hi}}^2$, то обусловленная той же причиной дисперсия суммарной нагрузки на исполнительном органе выражается суммой $\sigma_{\Sigma Z_h}^2 = \sum_{i=1}^{n_{pp}} \sigma_{Z_{hi}}^2$. При этом коэффициент вариации суммарной нагрузки равен:

$$v_{\Sigma Z_h} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n_{pp}} \sigma_{Z_{hi}}^2 / \left(\sum_{i=1}^{n_{pp}} Z_i\right)^2}. \quad (5)$$

В тех случаях, когда толщины стружки на резцах, имеющих одни и те же угловые координаты по дуге серповидного среза, одинаковы и, учитывая независимость коэффициента вариации толщины стружки v_{hi} от положения резца на срезе, а следовательно, и пропорциональных им коэффициентов вариации нагрузки на резце $v_{Z_{hi}}$ можем записать:

$$v_{\Sigma Z_h} = v_{Z_{hi}} \cdot q, \quad (6)$$

где q – параметр схемы расстановки резцов, определяемый по формуле (1).

Последнее выражение для $v_{\Sigma Z_h}$ позволяет дать объяснение упомянутому выше увеличению абсолютных погрешностей $\delta_{v_{tr}}$ оценки неравномерности нагруженности исполнительного органа, рассчитываемой по отраслевому стандарту ОСТ 12.44.109-79 [2], при уменьшении угла охвата γ_{oxb} . Из таблицы следует, что уменьшение угла охвата от 180° до 80° приводит к значительному увеличению параметра схемы расстановки резцов на исполнительном органе q за счет уменьшения числа одновременно контактирующих с забоем резцов. Это и является причиной увеличения коэффициента вариации суммарной нагрузки, определяемого неравномерностью перемещения комбайна (скорости подачи) $v_{\Sigma Z_h}$ оценка которого по стандарту ОСТ 12.44.109-79 [2] не учитывает влияния числа одновременно участвующих в разрушении массива резцов.

ВЫВОДЫ

1. Используемый для угледобывающих комбайнов метод расчета дисперсии нагрузки на исполнительном органе, обусловленной неравномерностью подачи комбайна, не учитывает влияния средней нагрузки и числа одновременно контактирующих резцов с забоем. В ряде случаев это является причиной значительной ошибки при оценке коэффициента вариации v_{tr} .

2. Коэффициент вариации суммарной нагрузки, определяемый неравномерностью перемещения комбайна $v_{\Sigma Z_h}$ зависит от средней нагрузки на исполнительном органе и скорости подачи комбайна, снижаясь с ростом момента на валу привода исполнительного органа M (при $V_{tr} = \text{const}$) и увеличиваясь с ростом скорости подачи (при $M = \text{const}$).

3. Силовая уравновешенность исполнительного органа не оказывает влияния на величину доли дисперсии нагрузки, обусловленной неравномерностью подачи комбайна.

Список литературы • References

1. Позин Е.З., Меламед В.З., Тон В.В. Разрушение углей выемочными машинами. М.: Недра, 1984. 288 с.
2. ОСТ 12.44.258-84. Комбайны очистные. Выбор параметров и расчет сил резания и подачи на исполнительных органах. Методика. М.: Изд-во Министерства угольной промышленности СССР. 1985. 108 с.
3. Оптимизация параметров исполнительных органов угледобывающих машин / В.Н. Захаров, Ю.Н. Линник, В.Ю. Линник и др. // Горный журнал. 2020. № 4. С. 44-47.
Zakharov V.N., Linnik Yu.N., Linnik V.Yu., Zhabin A.B. Optimization of actuator parameters of coal mining machines. *Gornyj zhurnal*, 2020;(4):44-47. (In Russ.).
4. Шабаев О.Е., Бредун И.И. Техническая диагностика резового исполнительного органа проходческого комбайна // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017. № 9. С. 94-101.
Shabaev O.E., Bridun I.I. Diagnostic engineering of cutting heads of tunneling machines. *Gornyj informatsionno-analiticheskij byulleten'*. 2017;(9):94-101. (In Russ.).
5. Жабин А.Б., Поляков А.В., Аверин Е.А. Сопоставление отечественных и зарубежных методов расчета усилий на лобовых дисковых шарошках при разрушении горных пород // Горный журнал. 2018. № 12. С. 65-68.
Zhabin, A.B., Polyakov, A.B., Averin, E.A. Comparison of methods to calculate forces on frontal disc cutters in rock breaking process in Russia and abroad. *Gornyj zhurnal*. 2018;(12):65-68. (In Russ.).
6. Zakharov V.N., Linnik V.Yu., Linnik Yu.N., Averin E.A. Loading of coal mining machine tools after change in spatial orientation of picks. *Eurasian Mining*. 2019;(1):40-42.
7. Jiang H.X., Meng D.G. 3D numerical modelling of rock fracture with a hybrid finite and cohesive element method. *Eng. Fract. Mech.* 2018;(199):280-293.
8. Линник Ю.Н., Жабин А.Б., Линник В.Ю., Поляков А.В. Оценка влияния отказов резцов и резцедержателей на показатели эффективности работы угледобывающих комбайнов. // Известия Тульского государственного университета. Науки о земле. 2018. Вып. 2. С. 247-263.
Linnik Yu.N., Zhabin A.B., Linnik V.Yu. Notes about how cutters and cutterholders malfunctions affect to indicators of coal-plow machines work efficiency. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*. 2018;(2) :247-263. (In Russ.).
9. Габов В.В., Нгуен К.Л., Нгуен В.С., Ле Т.Б., Задков Д.А. Обоснование геометрических и режимных параметров шнековых исполнительных органов, обеспечивающих эффективность погрузки угля на забойный конвейер // Уголь. 2018. № 2. С. 32-35. DOI: 10.18796/0041-5790-2018-2-32-35.
Gabov V.V., Nguyen K.L., Nguyen V.X., Le T.B., Zadkov D.A. The rationale of geometric and modal parameters of cutter drums ensuring the efficiency of coal loading onto a downhole conveyor. *Ugol'*. 2018;(2):32-35. (In Russ). DOI: 10.18796/0041-5790-2018-2-32-35.

10. Liu W., Zhu X., Jing J. The analysis of ductile-brittle failure mode transition in rock cutting. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2018;(163):311-319.
11. Rostamsowlat I., Richard T., Evans B. An experimental study of the effect of back rake angle in rock cutting. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2018;(107):224-232.
12. Исследование взаимодействия режущего инструмента с угольным массивом / Л.Е. Маметьев, А.А. Хорешок, А.М. Цехин и др. // Горное оборудование и электромеханика. 2018. № 6. С. 34-39.
Mametyev L.E., Khoreshok A.A., Tsekhin A.M., Borisov A.Yu. Research of interaction of the cutting tool with the coal massif. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*. 2018;(6):34-39. (In Russ.).
13. Liu Xiaohui, Geng Qi. Effect of contact characteristics on the self-rotation performance of conical picks based on impact dynamics modelling. *Royal Society Open Science*. 2020;7(5):article 200362. DOI: 10.1098/rsos.200362.

Authors Information

Linnik V.Yu. – Doctor of Economic Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Economy and Management in Fuel and Energy Complex, State University of Management of the Ministry of Science and Higher education, Moscow, 109542, Russian Federation, e-mail: vy_linnik@guu.ru

Linnik Yu.N. – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor of the Department of Economy and Management in Fuel and Energy Complex, State University of Management of the Ministry of Science and Higher education, Moscow, 109542, Russian Federation

Информация о статье

Поступила в редакцию: 10.01.2024

Поступила после рецензирования: 16.04.2024

Принята к публикации: 26.04.2024

Paper info

Received January 10, 2024

Reviewed April 16, 2024

Accepted April 26, 2024

Цены на уголь возвращаются к многолетней норме

Средняя цена на энергетический уголь в австралийском Ньюкасле, ключевом хабе Азиатско-Тихоокеанского региона (АТР), в марте 2024 г. достигла \$131 за 1 т, что на 30% ниже, чем в марте 2023 г. (\$187 за 1 т), и почти на 70%, чем в марте 2022 г. (\$314 за 1 т). Схожая динамика характерна и для южноафриканского хаба Ричардс-Бей, средние цены на котором снизились с \$294 за 1 т в марте 2022 г. до \$137 за 1 т в марте 2023 г. и \$105 за 1 т в марте 2024 г.

Падение цен во многом связано со снижением спроса на уголь в развитых странах, где угольная генерация стала сокращаться после прохождения пика энергетического кризиса. По данным Ember, выработка электроэнергии в ЕС в 2023 г. сократилась на 25%, достигнув 336 тераватт-часов (ТВт*ч), минимальной отметки за более чем два десятилетия. При этом доля угля в структуре электрогенерации в ЕС снизилась с 16,1% в 2022 г. до 12,5% в 2023 г. В свою очередь, в США объем угольной генерации в 2023 г. сократился на 19% (до 675 ТВт*ч), а ее доля – с 19,7% до 16,2%, согласно данным Управления энергетической информации (EIA).

Как и до пандемии COVID-19, основными центрами прироста спроса на энергетический уголь вновь становятся Индия и Китай. По оценке экспертов ассоциации «Глобальная энергия», ввод мощности новых угольных теплоэлектростанций (ТЭС) в КНР ускорился с 27,6 гигаватта (ГВт) в 2022 г. до 47,4 ГВт в 2023 г. Наряду с Индией Китай в 2023 г. обеспечил 76% глобального ввода мощности угольных ТЭС (52,9 ГВт из 69,5 ГВт). При этом к началу нынешнего года в КНР на стадии стро-

ительства находилось еще 139,8 ГВт мощности угольных ТЭС, а в Индии – 30,7 ГВт. Новые объекты угольной генерации также строятся в Индонезии (общей мощностью 9,4 ГВт), Бангладеш (3,9 ГВт), Вьетнаме (3,9 ГВт) и Южной Корее (2,1 ГВт).

При этом рост интереса к снижению выбросов стимулирует использование технологий «чистого» угля, в том числе так называемых «ультрасверхкритических» электростанций, КПД которых составляет от 44% до 46% (против 37-40% у «сверхкритических» и 33-37% у «субкритических»; чем выше КПД, тем меньше угля требуется для выработки одного и того же объема электроэнергии и тем ниже – эмиссия CO₂). Если в глобальной структуре мощности действующих угольных ТЭС доля «ультрасверхкритики» к началу 2024 г. составляла 22%, то в структуре строящихся – 72%.

Правда, обратной стороной является высокая капиталоемкость. По оценке EIA, стоимость ввода одного киловатта мощности «ультрасверхкритических» электростанций в США в текущих регуляторных и налоговых условиях составляет \$4507 (против \$1330 на кВт у парогазовых установок). При этом использование технологий, позволяющих улавливать 30% выбросов углекислого газа, увеличивает этот показатель до \$5577 на кВт, а при улавливании 90% CO₂ – до \$7176 на кВт.

Ассоциация по развитию международных исследований и проектов в области энергетики
«Глобальная энергия»