

9. Харченко, Н.В. Индивидуальные солнечные установки. – М.: Энергоатомиздат, 1991.
10. Солнечный нагреватель: патент 934 Респ. Беларусь, МПК F 24 J 2/00 / Северянин В.С.; заявитель Брестск. гос. техн. ун-т. — № и 20020319 заявл. 01.11.2002.
11. Гелиоустановка: патент 3998 Респ. Беларусь, МПК F 24 J 2/00 / Северянин В.С.; заявитель Брестск. гос. техн. ун-т. — № и 20070327 заявл. 02.05.2007.
12. Гелиоустановка: патент 6003 Респ. Беларусь, МПК F 24 J 2/00 / Северянин В.С., Янчилин П.Ф.; заявитель Брестск. гос. техн. ун-т. — № и 20090647 заявл. 23.07.2009.
13. Гелиоустановка: патент 6325 Респ. Беларусь, МПК F 24 J 2/00 / Северянин В.С., Янчилин П.Ф.; заявитель Брестск. гос. техн. ун-т. — № и 20090995 заявл. 25.11.2009.
14. Когенерационная гелиоустановка: Положительное решение от 02.11.2011, № и 20110511 от 2011.06.23
15. Система освещения: патент 6524 С1 Респ. Беларусь, МПК F 21 S 11/00 / Северянин В.С.; заявитель Брестск. гос. техн. ун-т. — № а 20000953 заявл. 2000.10.24, 2004.09.30.
16. Способ освещения: патент 6369 С1 Респ. Беларусь, МПК F 21 K 2/00 / Северянин В.С.; заявитель Брестск. гос. техн. ун-т. — № а 20000955 заявл. 2000.10.24, 2004.09.30.
17. Гелиоустановка: патент 6889 У Респ. Беларусь, МПК F 21 K 2/00, F 21 S 11/00 / Северянин В.С., Власова Т.А.; заявитель Брестск. гос. техн. ун-т. — № и 20100484 заявл. 21.05.2010.
18. Гелиоустановка: патент 6939 У Респ. Беларусь, МПК F 21 K 2/00, F 21 S 11/00 / Северянин В.С., Янчилин П.Ф.; заявитель Брестск. гос. техн. ун-т. — № и 20100555 заявл. 14.06.2010.

Материал поступил в редакцию 23.02.12

#### SEVERYANIN V.S., YANCHILIN P.F. Some ways of solar equipment evolution

The connections between energy parameters are considered for elements of solar. It is indicated that dimension of solar heat receiver is depended from many factors. Many examples of new solar equipments and using methods are described in this article.

УДК 534.142, УДК 628.3

Новосельцева Д.В.

### АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ НА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОМПОНЕНТОВ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМАХ ГОРЕНИЯ

**Введение.** Высокоэффективным способом сжигания топлива является пульсирующее горение. Пульсирующим горением называется неустойчивый режим горения с изменяющимися во времени динамическими характеристиками процесса, имеющими периодическую составляющую. Изменение характеристик процесса во времени, полученное В.С. Северяниным, представлено на рис. 1 [1].

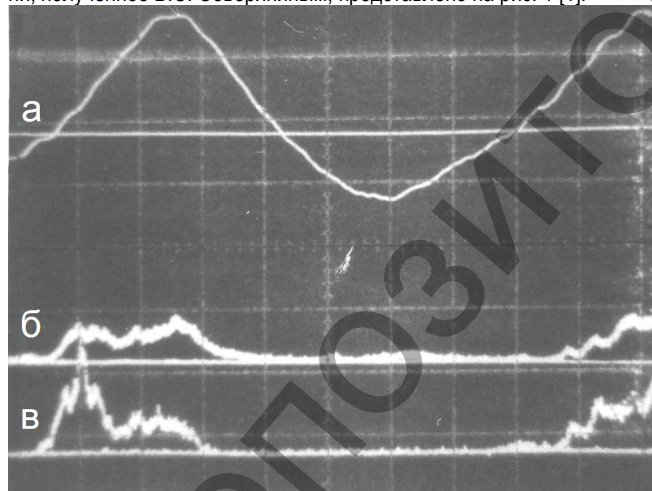


Рис. 1. Изменение динамических характеристик процесса во времени: а – изменение давления; б – изменение температуры; в – изменение концентрации радикалов

Для поддержания устойчивого пульсирующего режима необходимо соблюдение правила Рейля: теплоподвод должен осуществляться в фазе сжатия, т.е. должен совпадать с положительной фазой переменного давления.

При обсуждении особенностей пульсирующего горения газа [2] на первый план, как правило, выдвигаются вопросы интенсификации процессов переноса (теплопроводности, диффузии, конвективного теплообмена), перемешивания компонентов и т.д. под влиянием

пульсаций скорости. Наряду с этими важными явлениями большое значение имеет влияние пульсаций давления на макроскопическую кинетику реакций в пульсирующем газовом потоке. В настоящее время исследования по данному вопросу отсутствуют.

**Воздействие нестационарного давления.** Колебания давления, возникающие при слоевом пульсирующем горении газа, близки к гармоническим (см. рис. 1) и могут быть описаны известным соотношением [2]:

$$p(t) = p_{cp} + p_a \cdot \sin(\omega \cdot t), \quad (1)$$

где  $p_{cp}$  – среднее значение давления (атмосферное), Па;

$p_a$  – амплитудное значение давления, Па;

$\omega$  – круговая частота пульсаций,  $c^{-1}$ .

Перед оценкой воздействия нестационарного давления на кинетику реакции выясним, как влияет частота данных колебаний на скорость химической реакции. Для этого рассмотрим две молекулы, реакция между которыми, согласно теории активных соударений [3], может произойти при выполнении следующих условий:

молекулы должны столкнуться;

молекулы должны обладать необходимой энергией (энергией активации);

молекулы должны быть правильно ориентированы относительно друг друга.

Предположим, что одна из молекул неподвижна, молекулы обладают энергией активации и правильно ориентированы относительно друг друга. Тогда единственным необходимым условием для начала реакции является прохождение молекулой некоторого пути до соударения с другой молекулой, называемого средней длиной свободного пробега.

Средняя длина свободного пробега может быть вычислена по формуле [4]:

$$\lambda = \frac{\bar{V}}{Z}, \quad (2)$$

Новосельцева Дина Владимировна, ассистент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

где  $\bar{V}$  – средняя скорость теплового движения молекул;

$\bar{Z}$  – среднее число столкновений, определяемое следующей формулой [4]:

$$\bar{Z} = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot d_{эф}^2 \cdot n \cdot \bar{V}, \quad (3)$$

где  $d_{эф}$  – эффективный диаметр молекул, м;

$n$  – число молекул в единичном объеме.

Число молекул в единичном объеме  $n$  определяется при помощи числа Лoshмидта  $n_0$ , т.е. числа молекул идеального газа в кубическом метре при нормальных условиях:  $n_0 = 2,683 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$ . Для произвольных условий:

$$n = n_0 \cdot \frac{p \cdot T_0}{p_0 \cdot T}, \quad (4)$$

где  $p_0$  и  $T_0$  – давление и температура при нормальных условиях ( $p_0 = 101,3 \text{ кПа}$ ,  $T_0 = 273 \text{ К}$ ).

Определим время, необходимое для прохождения молекулой пути  $\lambda$ , т.е. время до соударения молекул:

$$\tau = \frac{\lambda}{\bar{V}}, \quad (5)$$

где  $\bar{V}$  – то же, что и в формуле (2) и согласно молекулярно-кинетической теории [4]:

$$\bar{V} = \sqrt{\frac{3 \cdot R \cdot T}{\mu}}, \quad (6)$$

где  $T$  – абсолютная температура, К;

$R$  – универсальная газовая постоянная, равная  $8,321 \text{ Дж/(моль}\cdot\text{К)}$ ;

$\mu$  – молярная масса газа,  $\text{г/моль}$ .

Подставив (2)–(4) и (6) в (5), получаем:

$$\tau = \frac{48,22}{d_{эф}^2 \cdot n_0 \cdot p} \cdot \sqrt{\frac{T \cdot \mu}{R}} \quad (7)$$

Под действием акустического давления происходит смещение частиц (молекул) среды в волне с амплитудой равной [5]:

$$A = \frac{p_a}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot Z}, \quad (8)$$

где  $p_a$  – максимальное акустическое давление (амплитуда давления), Па;

$f$  – частота пульсаций, Гц;

$Z$  – удельное акустическое сопротивление среды,  $\text{Па}\cdot\text{с/м}$ .

$$Z = \rho \cdot c, \quad (9)$$

где  $\rho$  – плотность среды,  $\text{кг/м}^3$ ;

$c$  – скорость звука,  $\text{м/с}$ .

Тогда с учетом (9) выражение (8) будет иметь вид:

$$A = \frac{p_a}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \rho \cdot c}. \quad (10)$$

Подставляя в (7) округленные значения  $d_{эф} = 14 \times 10^{-10} \text{ м}$ ,  $\mu = 29 \text{ г/моль}$  (для воздуха),  $n_0 = 2,7 \times 10^{25} \text{ м}^{-3}$ ,

$T = 1500 \text{ К}$ ,  $p = p_0 = 101300 \text{ Па}$ , получим  $\tau \approx 10^{-8} \text{ с}$ . Для других газов порядок вычисленной величины  $\tau$  тот же.

Сравнивая  $\tau$  с величиной полупериода равного  $1/2f \approx 10^{-2} \text{ с}$ , можно сделать вывод о том, что за время полупериода при любой частоте колебаний, возникающих в КПГ, химическая реакция закончится, а, следовательно, частота практически не влияет на кинетику реакции.

Выражение для определения скорости химической реакции, известное как закон действующих масс, имеет вид [6]:

$$W = k \cdot C_1^{n_1} \cdot C_2^{n_2} \cdot \dots \cdot C_m^{n_m} = k \cdot \prod_{i=1}^m C_i^{n_i}, \quad (11)$$

где  $W$  – скорость химической реакции;

$k$  – константа скорости реакции;

$C_1, C_2, \dots, C_m$  – концентрация исходных реагентов;

$n_1, n_2, \dots, n_m$  – порядок реакции по данному компоненту.

Сумма показателей степеней при концентрациях называется порядком реакции и выражается следующим соотношением:

$$N = \sum_{i=1}^m n_i. \quad (12)$$

Для нахождения зависимости скорости реакции от давления необходимо знать, как изменяются концентрации реагирующих веществ с изменением давления.

Эта зависимость может быть представлена следующим уравнением [6]:

$$C_i = \frac{p_i}{R \cdot T}, \quad (13)$$

где  $p_i$  – парциальное давление  $i$ -го компонента газовой смеси,

$R$  и  $T$  – то же, что и в формуле (6).

Подставив в (13) выражение для парциального давления:

$$p_i = p \cdot X_i, \quad (14)$$

где  $X_i$  – объемная или молярная доля  $i$ -го компонента газовой смеси;

$p$  – общее давление смеси,

получим следующее соотношение между концентрацией  $i$ -го компонента и общим давлением смеси:

$$C_i = \frac{p \cdot X_i}{R \cdot T}. \quad (15)$$

Подстановка выражения (15) в уравнение (11) с учетом (12) дает зависимость химической реакции от давления:

$$W(p) = k \cdot \frac{p(t)^N}{(R \cdot T)^N} \cdot \prod_{i=1}^m X_i^{n_i}. \quad (16)$$

Формула (16) определяет изменение во времени мгновенного значения скорости реакции, представленное на рис. 2. Среднее ее значение для установившегося процесса может быть выражено в виде зависимости:

$$W_{cp}(p) = \frac{k \cdot \prod_{i=1}^m X_i^{n_i} \int_{t_1}^{t_2} [p_{cp} + p_a \cdot \sin(\omega \cdot t)]^N dt}{(R \cdot T)^N (t_2 - t_1)}. \quad (17)$$

Определим значение скорости реакции, соответствующее среднему значению давления:

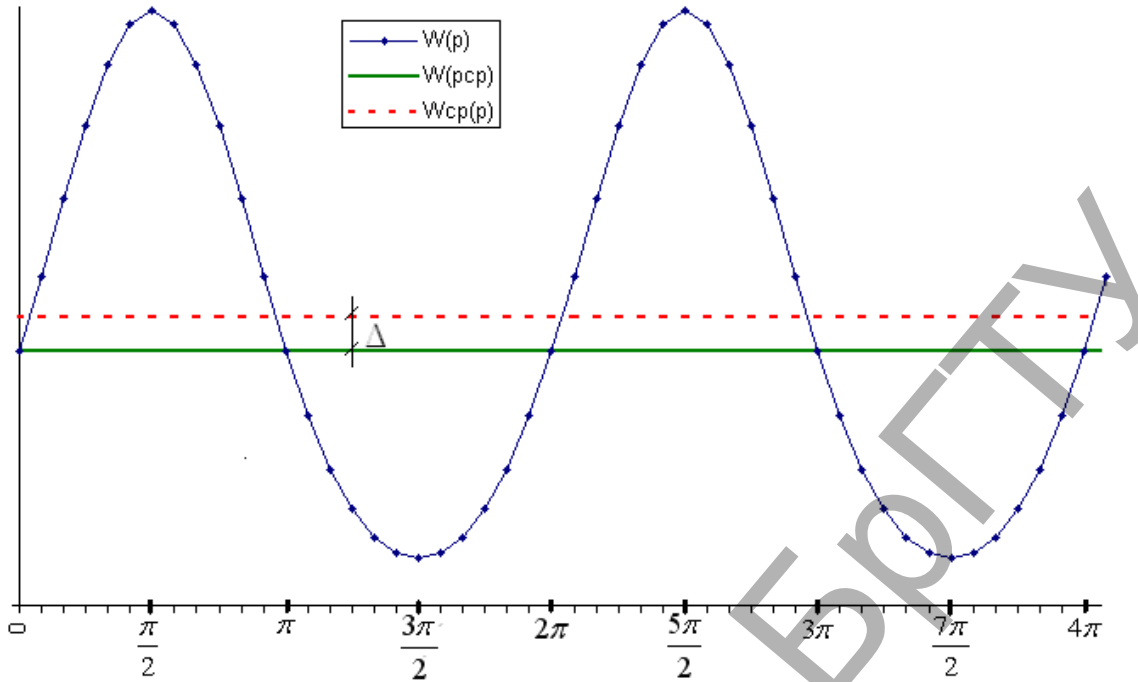


Рис. 2. Изменение мгновенного значения скорости химической реакции во времени при пульсациях давления

$$W(p_{cp}) = k \cdot \frac{p_{cp}^N}{(R \cdot T)^N} \cdot \prod_{i=1}^m x_i^{n_i} \quad (18)$$

Из рис. 2 видно, что среднее значение скорости реакции  $W_{cp}(p)$  больше скорости реакции при среднем значении давления  $W(p_{cp})$  на величину  $\Delta$ . Прирост  $\Delta$  обусловлен тем, что рост скорости реакции при повышении среднего значения давления на величину  $p_a$  превалирует над ее падением при снижении среднего давления на ту же величину.

Абсолютный прирост скорости химической реакции можно вычислить как разность среднего значения  $W_{cp}(p)$ , определяемого по формуле (17), и значения скорости химической реакции при среднем значении давления  $W(p_{cp})$  [7]:

$$\Delta = W_{cp}(p) - W(p_{cp}) \quad (19)$$

Выражение для относительного прироста функции, определяющего рост скорости химической реакции при пульсациях давления в зоне горения, имеет вид [7]:

$$\delta = \frac{W_{cp}(p)}{W(p_{cp})} - 1 = \frac{k \cdot \prod_{i=1}^m x_i^{n_i} \int_{t_1}^{t_2} [p_{cp} + p_a \cdot \sin(\omega \cdot t)]^N dt}{(R \cdot T)^N \cdot (t_2 - t_1) \cdot \frac{k \cdot \prod_{i=1}^m x_i^{n_i}}{(R \cdot T)^N} \cdot p_{cp}^N} - 1 = \quad (20)$$

$$= \frac{\int_{t_1}^{t_2} [p_{cp} + p_a \cdot \sin(\omega \cdot t)]^N dt}{p_{cp}^N \cdot (t_2 - t_1)} - 1.$$

После вычисления определенного интеграла, находящегося в числителе уравнения (20), предварительно разложив подынтеграль-

ное выражение по биному Ньютона и приняв  $t_2 - t_1$  равной периоду колебаний  $T'$ , а  $\omega = 2 \cdot \pi / T'$ , получаем:

$$\delta = \frac{\sum C_N^j \cdot p_{cp}^{N-j} \cdot \frac{p_a^j}{2}}{p_{cp}^N} - 1, \quad (21)$$

где  $C_N^j$  - биномиальный коэффициент, определяемый по формуле:

$$C_N^j = \frac{N!}{j! \cdot (N-j)!}, \quad (22)$$

где  $N=1,2,3,4,\dots$  (целое положительное число);

$j=0,2,4,6,8,\dots \leq N$  (целое четное положительное число).

Относительный прирост скорости химической реакции, обусловленный колебаниями давления в зоне реагирования, согласно (21) равен:

- для реакций первого порядка ( $N=1$ ; зависимость  $W(p)$  - линейная)

$$\delta = \frac{p_{cp}}{p_{cp}} - 1 = 0; \quad (23)$$

- для реакций второго порядка ( $N=2$ ; зависимость  $W(p)$  имеет вид параболы)

$$\delta = \frac{p_{cp}^2 + \frac{p_a^2}{2}}{p_{cp}^2} - 1 = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{p_a}{p_{cp}} \right)^2; \quad (24)$$

- для реакций третьего порядка ( $N=3$ ; зависимость  $W(p)$  имеет вид кубической параболы)

$$\delta = \frac{p_{cp}^3 + 3 \cdot p_{cp} \cdot \frac{p_a^2}{2}}{p_{cp}^3} - 1 = \frac{3}{2} \cdot \left( \frac{p_a}{p_{cp}} \right)^2. \quad (25)$$

На основании зависимостей (24)–(25) построен график, иллюстрирующий зависимость относительного прироста скорости реакции от амплитудного значения давления, для реакций 2-го и 3-го порядка, которые имеют место при сжигании топлив в пульсирующем потоке (рис. 3).

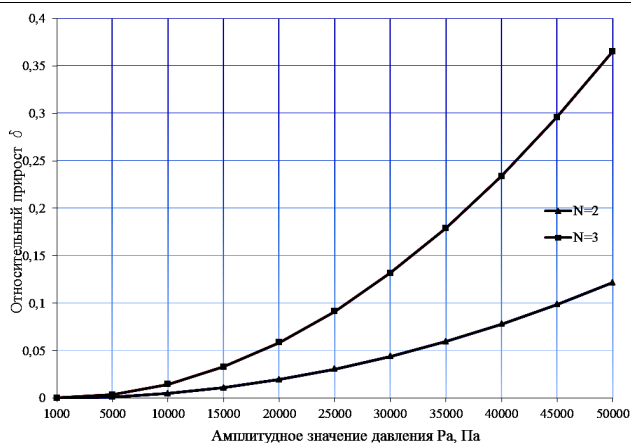


Рис. 3. Влияние амплитудного значения давления на увеличение скорости реакции

#### Заключение

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. На величину относительного прироста скорости реакции при прочих равных условиях значительное влияние оказывает величина амплитуды переменного давления.
2. При колебаниях давления, возникающих при пульсирующем горении, скорость горения возрастает, а, следовательно, увеличивается теплонапряженность топочного объема, которая представляет собой тепловыделение в единицу времени с единицы объема. Данное обстоятельство можно отнести еще к одному достоинству пульсирующего горения.

#### NOVOSELTSEVA D.V. Analys of influence of change of pressure on physical and chemical processes of interaction of components at non-stationary modes of burning

Influence of fluctuations of pressure on speed of chemical reaction at pulsing burning is analysed. Dependence of a relative gain of speed of reaction on peak value of pressure is received.

УДК 771.53:546.57

Константинова Е.В., Мельникова Е.А., Гурьянова Т.М., Ротахин И.А.

### ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ И ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АСПЕКТЫ ВОЗВРАТА СЕРЕБРА

**Введение.** В настоящее время в сферу кинопроизводства стремительно внедряются цифровые технологии. Но галогенсеребряная фотография по надёжности и качеству изображения не уступает своих позиций. Традиционная пленочная технология широко используется как в кинематографии, так и в различных направлениях классической фотографии.

Создание новой эмульсии — это дорогостоящий процесс, требующий больших инвестиций, однако ведущие фотографические фирмы вкладывают огромные средства в развитие галогенсеребряной (особенно цветной) фотографии, что и привело в последнее время к созданию киноплёнок нового поколения, которые соответствуют требованиям современного гибридного кинопроизводства.

Эмульсионные слои современных черно-белых и цветных негативных фотоматериалов, обладающие высокой светочувствительностью, содержат плоские таблитчатые микрокристаллы галогенида серебра — Т-кристаллы, которые благодаря особому строению рассеивают свет гораздо меньше, чем объемные кристаллы галогенида серебра.

Реализованы и принципиально новые супер-эффективные технологии с применением новых классов двухэквивалентных цветных компонент, обеспечивающих высокую скорость образования красителя.

Эмульсии, применяемые для изготовления современных цвет-

3. Следовательно, режим пульсирующего горения можно использовать для обезвреживания газообразных отходов низких концентраций (например, для термического обезвреживания запахов).

Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю профессору Северянину Виталию Степановичу за постановку задачи исследования, указания и рекомендации по расчетам, анализу результатов, выбору направления дальнейших научных поисков.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Северянин, В.С. Исследование пульсирующего горения как способа интенсификации теплотехнических процессов: диссертация на соискание степени доктора технических наук по специальности "Промышленная теплоэнергетика". — Саратов, 1987 — С. 15-18.
2. Технологическое пульсационное горение // В.А. Попов, В.С. Северянин, А.М. Аввакумов, В.Я. Лысков, Я.М. Щелоков / Под ред. В.А. Попова — М.: Энергоатомиздат, 1993. — 320 с.
3. Красноперов, Л.Н. Химическая кинетика: уч. пособие. — Новосибирск, 1988. — 106 с.
4. Сивухин, Д.В. Общий курс физики. Термодинамика и молекулярная физика. — М.: Наука, 1979. — 552 с.
5. Исакович, М.А. Общая акустика. — М.: Наука, 1973. — 495 с.
6. Каган, Я.А. Теория горения и топочные устройства: уч. пособие для студентов высш. учеб. заведений / Под ред. Д.М. Хзмаляна. — М.: Энергия, 1976. — 488 с.
7. Северянин, В.С. Оценка эффективности нестационарных топочных процессов // Вестник БГТУ. Водохозяйственное строительство. Теплоэнергетика. Экология. — 2003, №2(20). — С. 33-36.

Материал поступил в редакцию 01.03.12

ных негативных фотоматериалов, более однородны по размеру микрокристаллов галогенида серебра и почти все зональные эмульсионные слои негативных кинофотоматериалов изготовлены, как правило, из двух-трех полуслоев эмульсии с высокой, средней, низкой светочувствительностью с целью существенного уменьшения гранулярности и увеличения динамического диапазона.

В фотоматериалах фирмы Kodak серии Vision 3 внедрение технологии спектрально-избирательной поверхностной супер-сенсibilизации и технологии суб-микронных сенсоров изображения, позволяет существенно снизить размер зерна и улучшить резкость детали изображения.

Объектом представленного исследования являются современные кинофотоматериалы, используемые в учебном процессе Санкт-Петербургского государственного университета кино и телевидения для разработки норм возврата серебра и уменьшение экологической опасности от сливаемых растворов при их химико-фотографической обработке.

Фотографический метод регистрации информации за 170 лет доведен до совершенства. Благодаря своим преимуществам, таким как спектральная универсальность, высокая светочувствительность, высокая информационная емкость, достоверность, документаль-

Константинова Елена Владимировна, к.т.н., доцент, зав кафедрой научной и прикладной фотографии Санкт-Петербургского государственного университета кино и телевидения, Россия.

Мельникова Екатерина Александровна, доцент Санкт-Петербургского государственного университета кино и телевидения, Россия.

Гурьянова Татьяна Михайловна, доцент Санкт-Петербургского государственного университета кино и телевидения, Россия.

Ротахин Игорь Альбертович, доцент Санкт-Петербургского государственного университета кино и телевидения, Россия.

Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология