

Научно-исследовательские разработки возобновляемых источников энергии

Работа выполнена при финансовой поддержке МГУ имени М. В. Ломоносова НИР ГЗ №АААА-А16-116032810088-8.

Рецензия эксперта на статью получена 31.07.2018 [Expert review on the article was received on July 31, 2018].

Основной вектор научно-исследовательских работ лаборатории возобновляемых источников энергии (НИЛ ВИЭ) географического факультета Московского университета, проводимых с момента её образования в 1968 году, был направлен на решение технико-экономических и эколого-географических задач возобновляемых источников энергии. Далее представляются результаты исследовательских разработок последнего времени, относящиеся к: инновационным поисковым решениям эффективного использования низкопотенциальной тепловой энергии; методам определения энергетических потенциалов вторичных возобновляемых ресурсов; энергетическим оценкам снижения риска формирования катастрофически опасных гидравлических подъёмов течений при прохождении водосливных плотин гидроэнергетических станций.

Одним из этапов формирования приоритетных направлений рационального использования возобновляемых источников энергии является создание репрезентативной базы данных о ресурсах возобновляемых запасов энергии, в частности, формирующихся в процессах антропогенной деятельности в целом по России с детализацией по субъектам Российской Федерации. Эти данные являются исходной информацией для создания комплексов по реструктуризации вторичного энергосодержащего сырья, разработки региональных программ развития вторичной энергогенерации и обоснования мер государственной поддержки в области рационального использования вторичных возобновляемых энергоресурсов. Разработки лаборатории в этом направлении включали в себя: анализ и систематизацию имеющейся информации о всех видах вторичных ресурсов энергии ветра

Одним из этапов формирования приоритетных направлений рационального использования возобновляемых источников энергии является создание репрезентативной базы данных о ресурсах ВИЭ, в частности, формирующихся в процессах антропогенной деятельности в целом по России с детализацией по субъектам РФ

по России и по административным территориям с отбором наиболее достоверной информации для практического использования; уточнение методов расчёта и алгоритмов формирования баз данных валового и технического потенциалов вторичных ресурсов энергии; актуализацию и детализацию геоинформационного обеспечения и карт распределения вторичных ресурсов возобновляемой энергии по субъектам Российской Федерации.

В частности, в географических оценках мощности вторичных энергоресурсов входил расчёт энергетического потенциала отходов жилищно-коммунального и сельского хозяйств с детализацией до муниципальных образований субъектов РФ [1]. В развитии ранее разработанных методик расчёта энергетического потенциала биомассы была учтена структура сельскохозяйственного производства с детализацией объёмов производства по сельскохозяйственным организациям разного территориального уровня. Определён энергетический потенциал отходов коммунального хозяйства для одного из самых густонаселённых субъектов РФ — Московской области. Получены оценки энергетического потенциала твёрдых коммунальных отходов и отходов сточных вод городов

УДК 620.93

Научно-исследовательские разработки возобновляемых источников энергии

А. А. Соловьёв, д.ф.-м.н., профессор, заведующий НИЛ ВИЭ географического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова

В статье представлены результаты исследовательских разработок, выполненных в МГУ, с расчётами энергетических потенциалов вторичных возобновляемых биоэнергетических ресурсов (потенциалов) твёрдых бытовых отходов и осадков сточных вод, отходов сельскохозяйственного и промышленного производства для всех регионов России с учётом современного административно-территориального деления. Обсуждается эффективность технических решений по использованию низкопотенциальной тепловой энергии для охлаждения тепловых двигателей электростанций в башенных градирнях с внешним теплообменом. Предложена методика расчёта гидродинамического воздействия сходящих с плотин потоков на участки сливной поверхности водосливных плотин гидроэлектростанций, сопряжённых с речным дном.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, потенциалы вторичных энергоресурсов, низкопотенциальное тепло, профили водосливных плотин ГЭС.

UDC 620.93

Research and development of renewable energy sources

A. A. Solovyev, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Head of the Research Laboratory for Renewable Sources of Energy, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University

The article presents the results of research developments carried out at Moscow State University with calculations of the energy potentials of secondary renewable bioenergy resources (potentials) of solid domestic waste and sewage sludge, agricultural and industrial waste for all regions of Russia, taking into account the modern administrative and territorial division of the country. The efficiency of technical solutions for the use of low-potential thermal energy for cooling thermal engines of power plants in tower cooling towers with external heat exchange is discussed. A technique is proposed for calculating the hydrodynamic effect of flows coming down from the dams to areas of the drainage surface of spillway dams of hydroelectric power stations associated with the river bottom.

Keywords: renewable energy sources, potentials of secondary energy resources, low-potential heat, profiles of spillway dams of hydroelectric power plants.

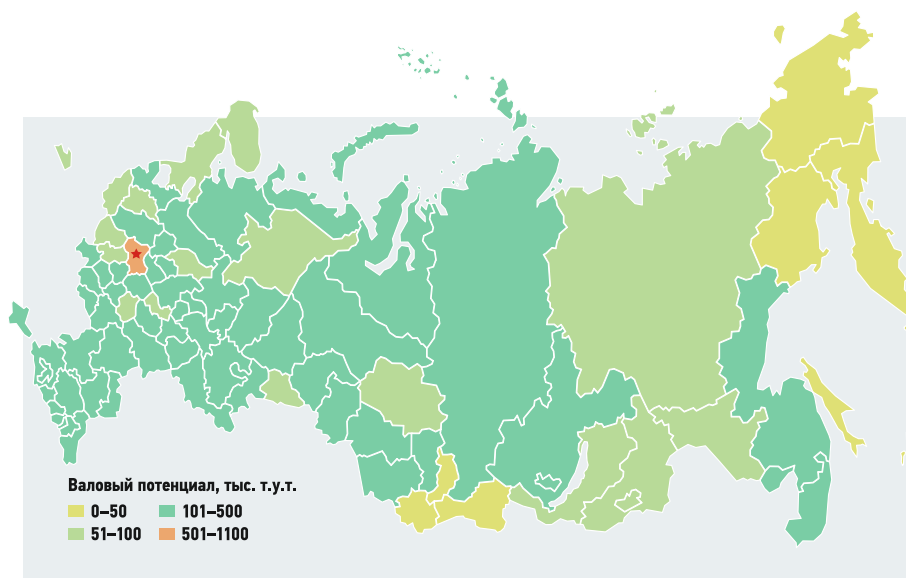


Рис. 1. Энергетический потенциал твёрдых бытовых отходов по областям России [1]

области с населением более 100 тыс. человек. Сделан вывод о высоком ресурсном энергетическом потенциале муниципальных отходов и целесообразности его использования для производства тепла и энергии (рис. 1).

Проведённые исследования показали, что усреднение энергетического потенциала ресурсов биоэнергетики по всей площади субъектов РФ оказывается малоинформативным для решения практических задач использования отходов сельского хозяйства. Выполнена оценка биоэнергетического ресурса сельскохозяйственного производства в масштабе муниципальных районов и городских округов. Полученные данные, представленные в виде таблиц и карт, позволили выявить территориальное распределение биоэнергетического потенциала сельского хозяйства Волгоградской области [2]. При расчётах технического потенциала отходов растениеводства и животноводства использовалась методика, детально изложенная в работе [3]. Принималось, что для преобразования в потребительскую энергию используется вся ежегодно образующаяся масса отходов. В качестве технологической переработки отходов рассматривалось получение электроэнергии и тепла с помощью мини-ТЭС с прямым сжиганием биомассы или мини-ТЭС на биогазе (для отходов растениеводства) и мини-ТЭС на биогазе (для отходов животноводства) [4]. Результаты работы рекомендованы для принятия управленческих решений при определении направлений развития биоэнергетики.

В развитии технологий утилизации отходов тепловых энергоресурсов выполнялись исследовательские разработки технологических решений использования низкопотенциального тепла применительно к повышению эффективности охлаждения в градирнях теплоносителей

энергетических машин. Работы по совершенствованию башенных испарительных градирен являются важным развитием одного из направлений развития возобновляемых источников энергии, а именно — утилизации низкопотенциального тепла, поскольку градирни представляют собой установки для утилизации низкопотенциального тепла, которое образуется при работе энергетических станций. Низкопотенциальное тепло используется в них для формирования потока наружного воздуха, с помощью которого охлаждается оборотная вода турбин электростанций, обеспечивающее увеличение коэффициента полезного действия станции. В современной энергетике охлаждение теплоносителей в градирнях осуществляется при испарении и взаимодействии с воздушными потоками, циркулирующими за счёт тяги в вытяжных башнях [5]. В конструкциях башенных градирен существуют области, в которые

поток наружного охлаждающего воздуха не попадает. Для достижения более равномерного распределения воздушных течений внутри башни, нами предложено ввести в конструкцию градирни воздухо-направляющие устройства [6]. В градирне с воздухонаправляющими устройствами, поток наружного воздуха направлялся не вдоль радиуса к центру основания градирни, а под углом к нему. В результате создавались условия для сокращения размеров мёртвых зон для потока наружного воздуха и увеличения времени его взаимодействия с развитой поверхностью воды в подросительном пространстве. Модернизированная градирня с системой воздухорегулирующих устройств была результативно реализована [7].

Несмотря на эффективность предложенных технических решений с регулированием воздушных потоков, охлаждающих теплоносители, в градирни остаются недостатки, связанные с тем, что оросительное устройство, расположенное внутри вытяжной башни, не выполняет в полной мере своей функции интенсификации процесса теплообмена. За счёт аэродинамического сопротивления, вносимого в поток оросителем, практически полностью заполняющим пространство градирни, создаются условия для уменьшения тяги вертикального потока в башне и, как следствие этого, снижения охлаждающей способности. Для устранения этого недостатка нами была предложена конструкция градирни с выносным оросителем [8]. В такой градирне водораспределительная система и оросительное устройство выносятся из вытяжной башни и располагается кольцом вокруг неё (рис. 2).

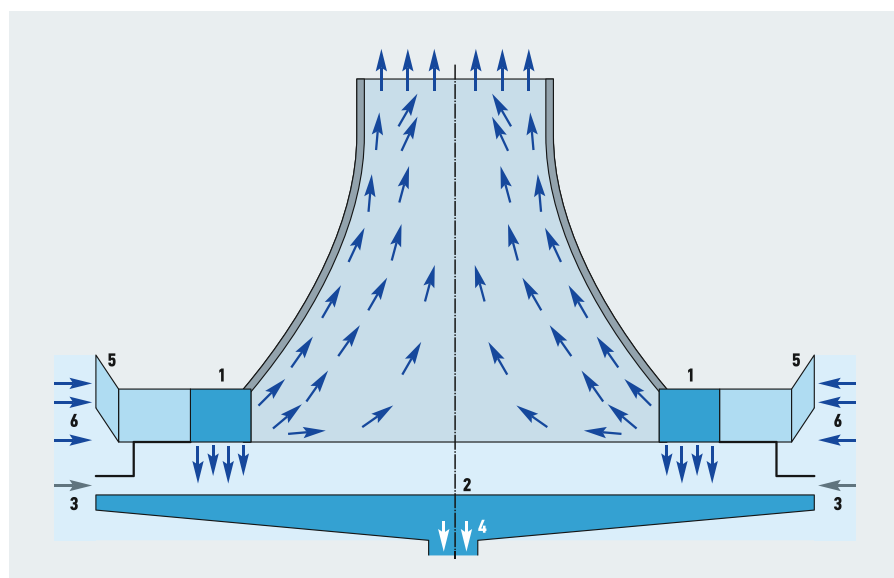


Рис. 2. Схема градирни с внешним теплообменом (1 — ороситель с водораспределительной системой; 2 — водосборный бассейн; 3 — вход тёплой воды; 4 — выход охлаждённой воды; 5 — воздухорегулирующие щиты; 6 — вход наружного воздуха)

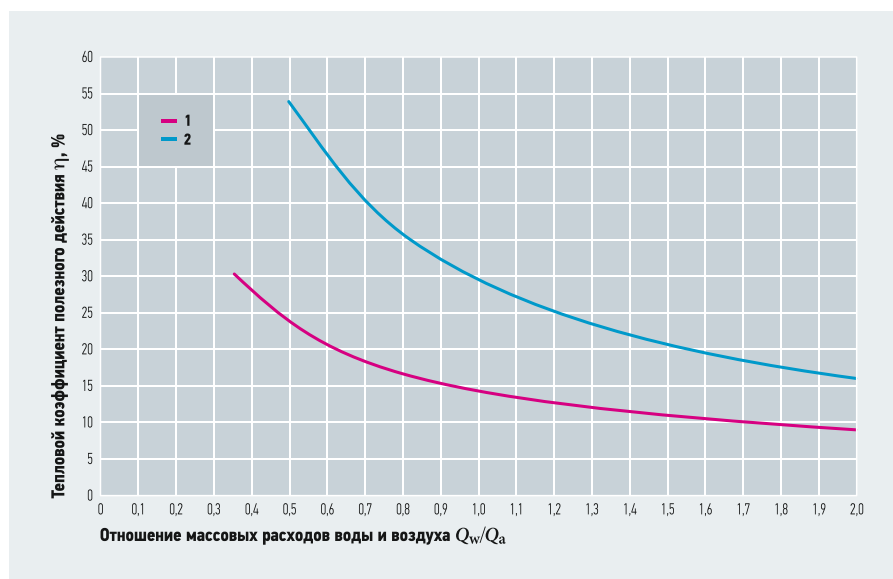


Рис. 3. Тепловая эффективность использования низкопотенциального тепла в градирнях с внутренним (1) и внешним размещением (2) охлаждающих устройств в зависимости от соотношения интенсивности водных Q_w и воздушных Q_a потоков

Расположением воздухонаправляющих щитов под углом к радиусу основания вытяжной башни изменяется длина пробега, а, следовательно, и время контакта потока наружного воздуха с развитой поверхностью тёплой воды, что увеличивает интенсивность теплообмена. Для сравнительной оценки эффективности охлаждающей способности градирен с внутренним и внешним теплообменом использовалась математическая модель, описывающая физические процессы испарения и контактного теплообмена воздушных потоков с паровоздушной смесью и водой. В качестве объекта рассматриваемой модели выбраны две башенные градирни с естественной тягой, содержащие оросительные насадки как внутри, так и вне башни, а также устройства воздухоулавливания в виде воздухоулавливающих поворотных щитов с вертикальной осью вращения в воздухоподводящих окнах.

Математическая модель течений в градирне представляет собой краевую задачу для системы обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих тепломассообмен между фазовыми состояниями «вода–воздух–пар» в процессе аэрогидродинамических взаимодействий теплоносителей. В тепломассообменную часть математической модели течений многофазных сред внутри градирни включаются дифференциальные уравнения сохранения массы и энергии для контактирующих потоков и уравнения тепломассообмена между фазами [9]. Аэродинамика и контактный теплообмен в модели градирни представляются системой дифференциальных уравнений движения, неразрывности, теплопровод-

ности и уравнением состояния. Граничными условиями задаются температура наружного воздуха на входе в башню, его влажность и давление, энтальпия воздуха, скорость входящих в башню течений, расход воздуха, закрутка потока с углом входа потока в градирню по отношению к радиусу опорного кольца башни для градирни с внутренним теплообменом и к радиусу внешнего кольца устройства с внешним оросителем. В верхнем сечении оросителя задаются начальный расход воды, температура воды, энтальпия пара для исходной температуры воды.

Реализация математической модели градирни была осуществлена в математическом пакете Matlab. Для оценок сравнительной эффективности двух вариантов градирен выполнены расчёты теплового коэффициента охлаждающей способности градирни:

$$\eta = \frac{t_{1w} - t_{2w}}{t_{1w} - \tau},$$

где t_{1w} — температура воды на входе в градирню; t_{2w} — температура воды на выходе; τ — температура мокрого термометра. При анализе тепловой эффектив-

Математическая модель течений в градирне представляет собой краевую задачу для системы обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих тепломассообмен между фазовыми состояниями «вода–воздух–пар» в процессе аэрогидродинамических взаимодействий теплоносителей

ности градирен рассматривалась зависимость теплового коэффициента полезного действия η от соотношения расходов «вода/воздух».

Представленные на рис. 3 результаты расчётов выполнены в двух типах градирен для одинаковых и стандартных условий режима эксплуатации: с расходом воды $Q_w = 100 \text{ м}^3/\text{ч}$, подаваемой на водораспределительную систему градирен; при температуре поступающей воды $t_{w1} = 40^\circ\text{C}$; при температуре наружного воздуха $t_a = 25^\circ\text{C}$; при относительной влажности воздуха $\psi = 50\%$ и массовом расходе воздуха в пределах $Q_a = 30\text{--}400 \text{ м}^3/\text{ч}$, изменяемом за счёт поворота щитов воздухоулавливающих устройств в интервале $(10^\circ\text{--}70^\circ)$. Выявляется очевидное преимущество в использовании низкопотенциального тепла при охлаждении водных теплоносителей в градирне с выносным оросительным устройством. В градирне с внутренним теплообменом только при достаточно больших расходах входящих воздушных потоков наружного воздуха и, следовательно, высоких значениях тяги, начинает проявляться заметный рост охлаждающей способности. В условиях высоких температур воздуха, близких к температуре охлаждаемой воды в градирне с выносным теплообменом, возможно достижение более высоких разностей температур входящей и выходящей воды, чем в градирне с внутренним теплообменом.

Одно из направлений исследовательских разработок было связано с энергетическими оценками гидравлических прыжков, возникающих при прохождении речных потоков через водосливные плотины гидроэлектростанций. Актуальность исследований условий предотвращения образования гидравлических прыжков (речных цунами) обуславливается необходимостью решения задачи относительно оптимизации формы профиля сливной поверхности плотин ГЭС в гидродинамически неустойчивых течениях. Длительный период использования водосливов позволил всесторонне изучить и исследовать процессы перетокки воды через плотины. Однако технический опыт показывает, что не все аспекты гидродинамических процессов с равной полнотой учитываются в большом количестве эмпирических таблиц для расчёта отдельных участков криволинейного профиля водосливов [10].

Вычисления по табулированным данным содержат неточности при определении радиусов сопряжения сливной поверхности водослива с водобоем. Они проявляются для высотных плотин с от-

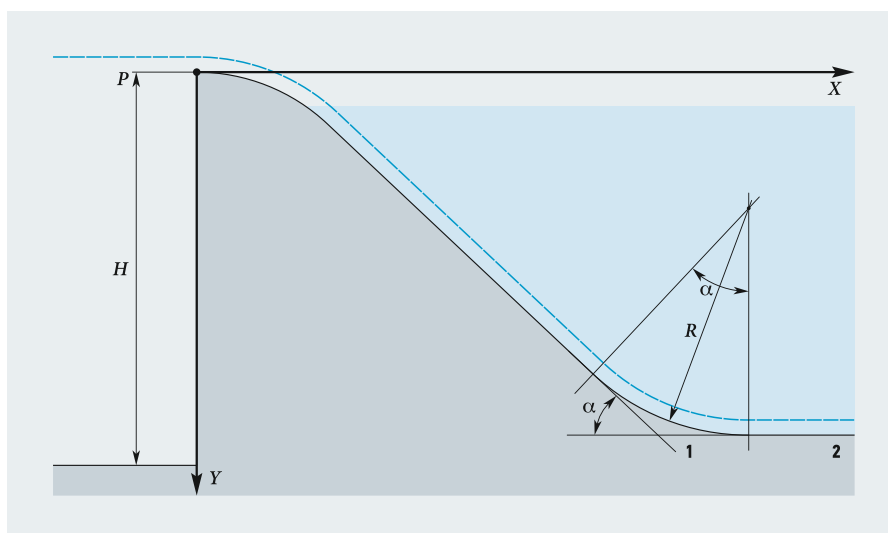


Рис. 4. Схема расчёта сопряжения профиля (1) водосливной плотины ГЭС с водобоем (2)

носительно большими значениями напоров, при которых создаются условия, способствующие формированию и отгону от плотины катастрофически опасных гидравлических прыжков. Следует отметить, что требованиям безопасности течений за плотинами не отвечают и многочисленные эмпирические и полуэмпирические формулы для расчёта радиусов сопряжения профиля плотин с водобоем, поскольку все они являются фактически разными модификациями опытных таблиц.

На основе рассмотрения эффектов, обусловленных гидродинамической неустойчивостью процесса взаимодействия струйных течений, сходящих с криволинейной поверхности водосливных плотин, сопряжённых через сегментный участок окружности с водобойным участком речного дна, авторами предложен способ расчёта радиуса сопряжения профиля плотин с водобоем

Обычно в попытках обоснования эмпирических формул исходят из учёта сил давления на водобой, связанных только с кинетической энергией, потоков, сходящих с начальных участков криволинейного профиля безвакуумного водослива. Между тем, гидродинамическая неустойчивость, приводящая к возникновению скачкообразного резкого подъёма воды за плотиной, провоцируется глубиной воды в придонном сжатом сечении меньшей критической глубины, соответствующей минимуму полной механической энергией потока [11]. По данным эксплуатационных работ, вклад потенциальной



составляющей энергии в формирование опасных режимов генерации с прыжками на водосливах без профилирования плавного сопряжения сливной поверхности с водобоем составляет от 18 до 65% от полной энергии течения через плотину [4, 11]. Это указывает на то, что без учёта вклада потенциальной энергии в глубину потоков воды, формирующихся в сжатом придонном сечении проблематично корректно рассчитать радиус сопряжения криволинейного профиля водослива с водобоем, обеспечивающий уменьшение вероятности образования гидродинамических прыжков.

На основе рассмотрения эффектов, обусловленных гидродинамической неустойчивостью процесса взаимодействия струйных течений, сходящих с криволинейной поверхности водосливных плотин,

сопряжённых через сегментный участок окружности с водобойным участком речного дна, нами предложен способ расчёта радиуса сопряжения профиля плотин с водобоем. Аналитический расчёт радиуса R конъюгации (сопряжения) (рис. 1) выполняется в предположении, что поток с напором H , сходящей по сливной поверхности водослива высотой P с криволинейной формой профиля с углом α к горизонту, соответствует движению жидкости, удовлетворяющему закону сопротивления турбулентного режима течений, оказывающих динамическое воздействие на криволинейный участок сегмента окружности, сопрягающей профиль с водобоем.

При определении сопряжения профиля водослива с водобоем целесообразно

считать, что глубины воды на сегментной части профиля водослива, определяются массой воды плотности ρ над поверхностью площади S в виде силы F давления, действующей по всей ширине водослива B : $F = \rho g S B$, где $S = \pi R^2 \alpha / 360$, где α — центральный угол сектора.

Давление, оказываемое этой силой на концевую поверхность сопряжения водослива с водобоем, с учётом того, что длину дуги сегмента можно приблизительно заменить радиусом окружности будет равно $p_{\text{доп}} \approx F / B R$. Дополнительное центробежное давление на концевую сегментную поверхность, которое оказывается потоком при его повороте, может быть записано в виде следующего равенства $p_{\text{доп}} = \rho V^2 h / R$. Здесь V и h — скорость и критическая глубина воды в зоне сопряжения.

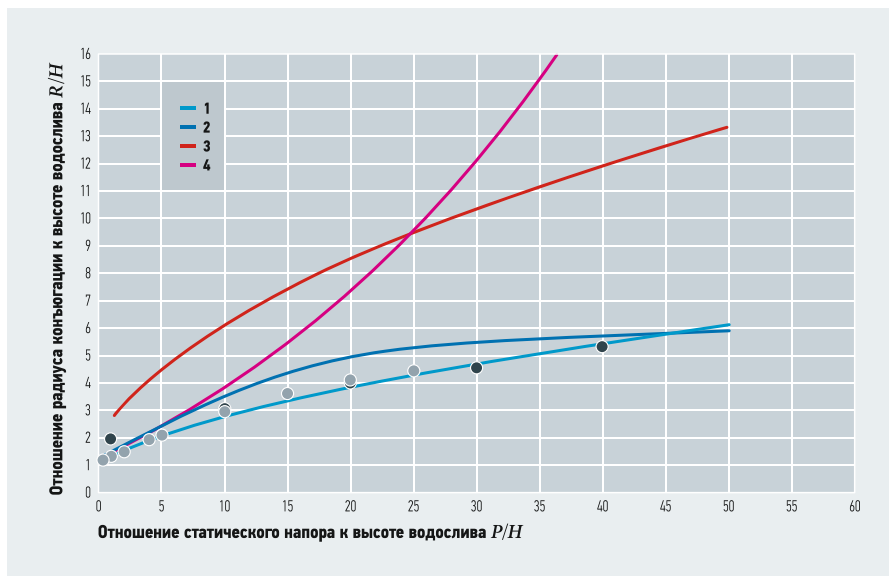


Рис. 5. Расчётные и опытные значения радиуса конъюгации, нормированного на статический напор (1 — расчёт по формуле авторов (3); 2 — расчёт по [12]; 3 — расчёт по [13, 14]; 4 — расчёт В. Чоу [15]; ● — опытные данные П. Г. Киселёва [10]; ● — табулированные опытные данные [16])

Принимая во внимание скорость потока, сходящего с водослива и критическую глубину воды на водобое, получена следующая расчётная формула для вычисления радиуса сопряжения:

$$R = C \sqrt{\frac{360(H+P)H}{\pi\alpha}}, \quad (1)$$

где α — центральный угол сектора в градусах; безразмерный множитель C представляет собой комбинацию корректирующих коэффициентов скорости φ и Кориолиса β :

$$C = \sqrt{2\varphi^2} \sqrt[3]{2\beta m^2}.$$

На графиках, представленных на рис. 5, для объединения значений, полученных вычислением по приведённым формулам, и данных, взятых из опытных наблюде-



ний были выбраны значения радиусов сопряжения с нормировкой на статические напоры H и высоту водослива P .

Из представленных на рис. 5 данных видно, что практически все формулы при малых относительных высотах водослива при P/H , приблизительно расположенных в интервале 9–10, значения радиусов сопряжения совпадают между собой. Полученная в работе формула (1) достаточно близко соответствует опытным данным практически во всём диапазоне высот водослива и напоров с относительно небольшим расхождением.

Расхождение расчётов по формулам по эмпирическим соотношениям для высотных плотин, по-видимому, связано с недостаточно полным определением динамических давлений, происходящих от характерных глубин в зоне сопряжения, где динамические воздействия в лучшем приближении согласуются с критически-

ми глубинами, характерными для развитых турбулентных режимов сбросных потоков.

Этот вывод также подтверждается сравнительной оценкой разности потерь мощности потоков за водосливом без и с сопряжением по расчётным значениям подъёма глубин (рис. 6). Отклонения фактического профиля от расчётного свидетельствуют о значимости влияния на сопряжение профиля водослива с водобоем соотношения глубины сжатия и критической глубины гидродинамически неустойчивых течений после водосброса.

В заключение отметим работу, выполняемую лабораторией по пропаганде отечественных научно-исследовательских разработок возобновляемых источников энергии в рамках Всероссийских научно-молодёжных школ по возобновляемым

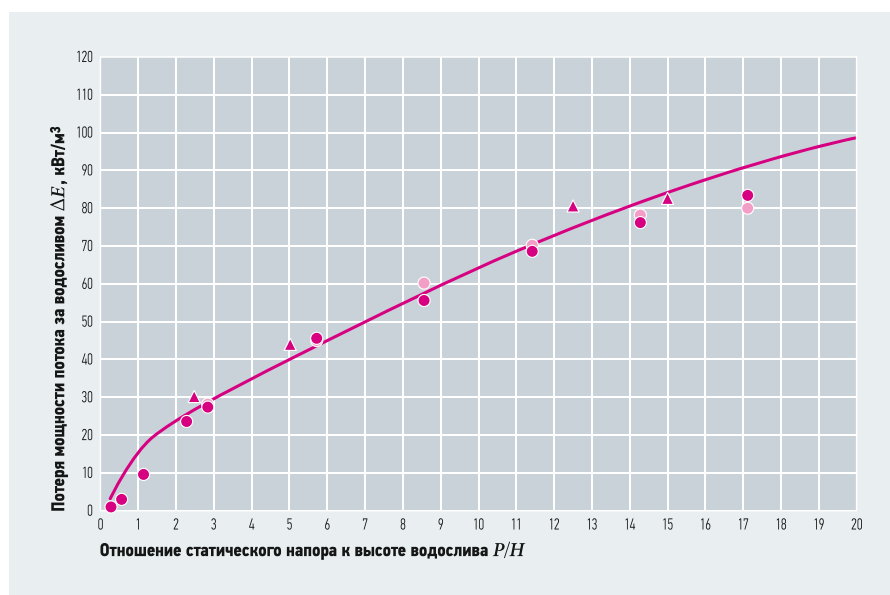


Рис. 6. Относительные потери мощности турбулентных потоков, сходящих с водосливных плотин без сопряжения с водоемом и имеющих плавный переход на речное дно (сплошная линия — расчёт по формуле Борда [16] с учётом радиуса сопряжения профиля сливной поверхности по формуле (1) и прямого профилирования без сопряжения с дном; точки — экспериментальные наблюдения по данным [10, 17])

источникам энергии, проводимых в Московском государственном университете начиная с 1999 года.

Молодёжные научные школы — это образовательный проект по обучению и повышению квалификации молодых учёных, работающих в области возобновляемой энергетики, их ориентации на решение актуальных задач теории и практики. В декабре 2018 года в Московском госуниверситете на географическом факультете будет проводиться XI Всероссийская научная молодёжная школа «Возобновляемые источники энергии».

Научные доклады и лекции специалистов в области ВИЗ призваны дать представление о современном состоянии исследований и прикладных разработок в области возобновляемой энергетики, связанных с удовлетворением возрастающих потребностей в рациональном использовании возобновляемых источников энергии в энергодефицитных районах и экологически напряжённых территориях

В работе школы предполагается участие аспирантов, магистрантов и бакалавров ведущих высших учебных заведений Российской Федерации, молодых учёных и специалистов, научных и производственных организаций из России, ряда зарубежных стран.

Научные доклады и лекции специалистов в области возобновляемой энергетики призваны дать представление о современном состоянии исследований и прикладных разработок в области возобновляемой энергетики, связанных с удовлетворением возрастающих потребностей в рациональном использовании возобновляемых источников энергии в энергодефицитных районах и экологически напряжённых территориях.

Завершая рассмотрение исследовательских разработок Лаборатории возобновляемых источников энергии, отметим, что на значимый переход России к освоению возобновляемых источников энергии можно рассчитывать при условии, что приоритет исследований будет за фундаментальными разработками.

Выводы

1. В башенных испарительных градирнях электростанций использование низкопотенциального тепла с коэффициентом эффективности обеспечивается при внешнем размещении воздухозаборных и оросительных систем. Утилизация отходов низкопотенциального тепла для производства электричества может быть реализовано на основе градирен с внешним теплообменом.

2. Выполненные в Лаборатории возобновляемых источников энергии МГУ разработки и полученные материалы и данные по определению энергетических потенциалов и динамики возобновления запасов вторичных энергетических ресурсов — биомассы твёрдых бытовых,

сельскохозяйственных и промышленных отходов, актуализированные по субъектам Российской Федерации, — могут быть рекомендованы для принятия управленческих решений для обеспечения эффективной реализации задач рационального природопользования.

3. Представленные результаты энергетических оценок интенсивности гидравлических прыжков, возникающих при прохождении речных потоков через плотины гидроэлектростанций, свидетельствуют о целесообразности использования при проектировании разработанных аналитических методов расчёта параметров плавного сопряжения профильных поверхностей водосливов с водобойными участками речного дна, снижающих риск распространения гидравлических прыжков по течению.

1. Андреевко Т.И., Киселёва С.В. Энергия из биомассы: проблемы и ресурсы // Энергетический вестник, 2016. №21. С. 50–59.
2. Андреевко Т.И., Киселёва С.В., Рафикова Ю.Ю. Комплексный анализ распределения ресурсов биоэнергетики для территории Волгоградской области // Альтернативная энергетика и экология (Саров), 2017. №07–09 (219–221). С. 49–59.
3. Справочник по ресурсам возобновляемых источников энергии России и местным видам топлива (показатели по территориям) / Под ред. П.П. Безруких. — М.: Энергия, 2007. 272 с.
4. Панцхава Е.С., Беренгартен М.Г., Вайнштейн С.И. Биогазовые технологии. Проблемы экологии, энергетики, сельскохозяйственного производства. — М.: Центр «Экорос», 2008. 217 с.
5. Берман Л.Д. Испарительное охлаждение циркуляционной воды. — М.-Л.: Госэнергоиздат, 1949. 440 с.
6. Патент РФ №2196947. МПК F28C1/00, E04H5/12. Воздуховод башенной испарительной градирни с турбулизацией вихревого потока / Соловьёв А.А., Нигматулин Р.И., Гусинская Н.В., Малых Ю.Б. Заявл.: 22.03.2001. Опубл. 20.01.2003.
7. Kazarov G.I. Report on the Technical Meeting on Advances in Non-Electric Applications of Nuclear Energy and Efficiency Improvement at Nuclear Power Plants. International Atomic Energy Agency, Ontario, 2014.
8. Патент РФ №2527799. МПК F28C1/00, F28F25/00. Башенная испарительная градирня с внешним теплообменом / Соловьёв А.А., Чекарев К.В. Заявл.: 28.06.2013. Опубл.: 10.09.2014.
9. Dobrego K.V. et al. Simulation of cooling tower and influence of aerodynamic elements on its work under conditions of wind. Energy. 2014. Vol. 60. No. 6.
10. Справочник по гидравлическим расчётам / Под ред. П.Г. Киселёва. Изд. 4-е, перераб. и доп. — М.: Энергия, 1972. 312 с.
11. Штеренлихт Д.В. Гидравлика. Изд. 3-е, перераб. и доп. — М.: КолосС, 2005. 655 с.
12. Butakov A.N. Equations for the flow coefficient of a weir and the conjugation radius of the overflow surface and the downstream bottom. Hydrotechnical Construction. 1995. Vol. 29. No. 9. Pp. 538–542.
13. Остякова А.В. Сопряжение водосливной поверхности с водоемом для водосливов безвакуумного профиля // Вестник МГСУ, 2011. №5. С. 306–310.
14. Ostyakova A.V., Borovkov V.S. Analysis of merge between spillway surface and toe basin for spillways with curvilinear vacuum-free profile. Power Technology and Engineering. 2014. Vol. 48. No. 1. Pp. 6–9.
15. Чоу В.Т. Гидравлика открытых каналов. — М.: Стройиздат, 1969. 462 с.
16. Соловьёв А.А. Речная гидравлика: Учеб. пос. — М.: Альфа-МГВТ, 2004. 145 с.
17. Павловский Н.Н. Гидравлический справочник. — М.-Л.: ОНТИ, 1937. 890 с.

References — see page 93.

Research and development of renewable energy sources. Pp. 86–91.

A.A. Solovyev, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Head of the Research Laboratory for Renewable Sources of Energy, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University

1. Andreenko T.I., Kiseljova S.V. *Jenergija iz biomassy: problemy i resursy* [Energy from Biomass: Problems and Resources]. *Jenergeticheskij vestnik* ["Power Industry Herald" Magazine]. 2016. No. 21. Pp. 50–59.
2. Andreenko T.I., Kiseljova S.V., Rafikova Ju.Ju. *Kompleksnyj analiz raspredelenija resursov biojenergetiki dlja territorii Volgogradskoj oblasti* [Comprehensive analysis of the distribution of bioenergy resources for the territory of the Volgograd Region]. *Al'ternativnaja jenergetika i jekologija (Sarov)* [Alternative Energy and Ecology (Sarov city)]. 2017. No. 07–09. Vol. 219–221. Pp. 49–59.
3. *Spravochnik po resursam vozobnovljaemyh istochnikov jenerгии Rossii i mestnym vidam topliva* (pokazateli po territorijam) [Handbook on renewable energy resources of Russia and local fuels (indicators by territories)]. Edit. by P.P. Bezrukih. Moscow. *Jenergija* ["Energy" Publishers]. 2007. 272 p.
4. Panchava E.S., Berengarten M.G., Vajnshtejn S.I. *Biogazovye tehnologii. Problemy jekologii, jenergetiki, sel'skhozajstvennogo proizvodstva* [Biogas technologies. Problems of ecology, energy, agricultural production]. Moscow. Centr "Jekoros" ["Ecoros" Center]. 2008. 217 p.
5. Berman L.D. *Isparitel' noe ohlazhdenie cirkuljacionnoj vody* [Evaporative cooling of the circulating water]. Moscow-Lenigrad. Gosjenergoizdat ["Gosjenergoizdat" Publishers]. 1949. 440 p.
6. Patent RF No. 2196947. IPC F28C1/00, E04H5/12. *Vozduhovod bashennoj isparitel'noj gradirni s turbulizacijej vihrevogo potoka* [Airway of the tower evaporative cooling tower with turbulization of the vortex flow]. Solov'jov A.A., Nigmatulin R.I., Gusinskaja N.V., Malyh Ju.B. Decl.: Mart 22, 2001. Publ. January 01, 2003.
7. Kazarov G.I. Report on the Technical Meeting on Advances in Non-Electric Applications of Nuclear Energy and Efficiency Improvement at Nuclear Power Plants. International Atomic Energy Agency. Ontario. 2014.
8. Patent RF No. 2527799. IPC F28C1/00, F28F25/00. *Bashennaja isparitel'naja gradirnja s vmesnim teploobmenom* [Tower evaporative cooling tower with external heat exchange]. Solov'jov A.A., Chekarev K.V. Decl.: June 28, 2013. Publ.: September 10, 2014.
9. Dobrego K.V. et al. Simulation of cooling tower and influence of aerodynamic elements on its work under conditions of wind. Energy. 2014. Vol. 60. No. 6.
10. *Spravochnik po gidravlicheskim raschjotam* [Handbook of hydraulic calculations]. Edit. by P.G. Kiseljova. 4th edition, rev. and exp. Moscow. *Jenergija* ["Energy" Publishers]. 1972. 312 p.
11. Shterenliht D.V. *Gidravlika* [Hydraulics]. 3rd edition, rev. and exp. Moscow. *Kolos*. 2005. 655 p.
12. Butakov A.N. Equations for the flow coefficient of a weir and the conjugation radius of the overflow surface and the downstream bottom. Hydrotechnical Construction. 1995. Vol. 29. No. 9. Pp. 538–542.
13. Ostjakova A.V. *Sopryazhenie vodoslivnoj poverhnosti s vodoemom dlja vodoslivov bezvakuumnogo profilja* [Conjugation of the spillway surface with water for weirs without a vacuum profile]. *Vestnik MGSU* [Papers of Moscow State National Research University of Civil Engineering (NRU MGSU)]. 2011. No. 5. Pp. 306–310.
14. Ostyakova A.V., Borovkov V.S. Analysis of merge between spillway surface and toe basin for spillways with curvilinear vacuum-free profile. Power Technology and Engineering. 2014. Vol. 48. No. 1. Pp. 6–9.
15. Chou V.T. *Gidravlika otkrytyh kanalov* [Hydraulics of open channels]. Moscow. Strojizdat ["Strojizdat" Publishers. Building publishing house]. 1969. 462 p.
16. Solov'jov A.A. *Rechnaja gidravlika: Uchebn. pos.* [Hydraulics of rivers: Textbook]. Moscow. Al'tair-MGAVT. 2004. 145 p.
17. Pavlovskij N.N. *Gidravlicheskij spravochnik* [Hydraulic reference book]. Moscow-Leninograd. ONTI [Joint scientific and technical Publishing House (JSTPH). Publishing House of physical and mathematical and technical literature ("Fizmatlit")]. 1937. 890 p.